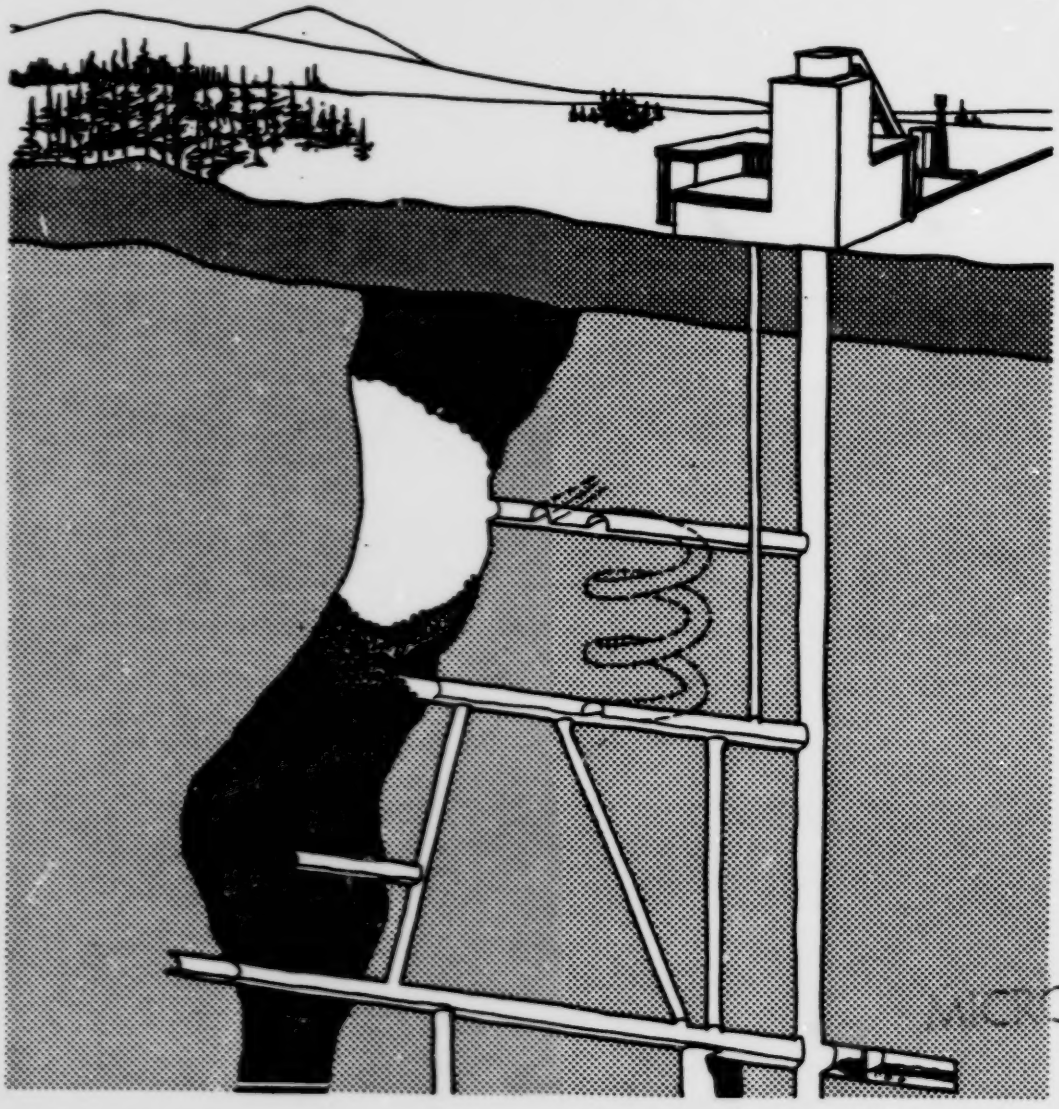
REG. NO. 3-9005

Energy, Mines and Resources Canada
Énergie Mines et Ressources Canada

Research and Technology
Recherche et Technologie

CONTRACT REPORT NO. 15Q83-00013

PILIERS DE SURFACE



ROCHE MINES
associés ltée
Groupe-conseil

RAPPORT FINAL

Energy, Mines and Resources Canada
Research and Technology

Énergie, Mines et Ressources Canada
Recherche et Technologie

RAPPORT FINAL

ETAT DE LA QUESTION SUR LE DIMENSIONNEMENT ET LA STABILITE DES PILIERS DE SURFACE

(THIS REPORT IS AVAILABLE IN ENGLISH)

FEVRIER 1984	VOTRE DOSSIER: # 26SQ.23440-3-9005 NOTRE DOSSIER: # 3176-0000

307pp

ROCHE MINES
associés ltée
Groupe-conseil

Marcel Allard
21693
QUÉBEC

Serge Nantel
28218
QUÉBEC

TABLE DES MATIÈRES

PAGE

I- INTRODUCTION 1

1.1 MANDAT ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE 1
1.2 ÉQUIPE DE TRAVAIL 3
1.3 PROFIL DU RAPPORT 3

II- TERMINOLOGIE 8

III- RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE 11

3.1 CLASSIFICATIONS DES PILIERS 13
3.2 MÉTHODES DE CONCEPTION 16
3.3 FACTEURS DE SÉCURITÉ 20
3.4 ÉQUATIONS DE DIMENSIONNEMENT 21
3.5 PROGRAMME DE SURVEILLANCE 22
3.6 RÉGLEMENTATION 24

IV- VISITES DES MINES 26

V- DISCUSSIONS SUR LES PILIERS DE SURFACE

5.1 CLASSIFICATION 33
5.2 CONCEPTION 37
5.3 INSTRUMENTATION, CONTRÔLE, SOUTÈNEMENT 39
5.4 RÉGLEMENTATION 41
5.5 CONCLUSION 44

VI- RECOMMANDATIONS 46

6.1 ÉTAPE DE L'OBSERVATION 47
6.2 ÉTAPE DES MESURES 47
6.3 ÉTAPE DE L'ANALYSE 48
6.4 ÉTAPE DE LA CONCEPTION 48
6.5 ÉTAPE DE LA VÉRIFICATION 50

TABLE DES MATIÈRES (suite)

PAGE

VII- MODALITÉS D'APPLICATION DES RECOMMANDATIONS 51

ANNEXE 1 - TERMINOLOGIE DES PILIERS 57

ANNEXE 2 - RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE - MÉTHODOLOGIE 71

ANNEXE 3 - VISITE DES MINES 137

I- INTRODUCTION

Il existe au Québec et au Canada de nombreux gisements exploités en souterrain, dont la minéralisation se termine près de la surface, sous une couche plus ou moins épaisse de terrains marécageux, sous une nappe d'eau ou encore sous des constructions permanentes. Dans ces circonstances, il est nécessaire de conserver une calotte rocheuse suffisamment solide pour isoler les chantiers souterrains des matériaux de surface, incapables de se supporter eux-mêmes.

Le récent désastre survenu à la mine Belmoral, dans le nord-ouest québécois, nous rappelle d'ailleurs l'importance de ce sujet. Celà a créé chez les divers intervenants du monde minier une volonté de faire le point sur la technologie développée à ce jour afin de concevoir la forme de la couverture de protection ou pilier de surface, d'en évaluer et contrôler la stabilité.

En première analyse, il est surprenant de constater la carence d'études spécifiquement reliées à ce genre de pilier tant au Québec qu'au Canada ou ailleurs dans le monde.

1.1 MANDAT ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Le Groupe-Conseil Roche et Associés a obtenu le mandat d'étudier la situation actuelle du dimensionnement et de la stabilité des piliers de surface dans les mines souterraines canadiennes. Ce projet est financé par le Centre Canadien de la Technologie des Minéraux et de l'Énergie (CANMET) et réalisé avec la collaboration de l'Association des Mines de Métaux du Québec (AMMQ), du Centre de Recherches Minérales du Québec (CRM),ainsi que des représentants des compagnies minières québécoises.

Les objectifs de l'étude des piliers de surface se définissent comme suit:

- établir, par un inventaire de la littérature aussi complet que possible, ce qui a été fait dans le domaine; en insistant plus particulièrement sur les aspects relatifs à la stabilité, au dimensionnement, à la règlementation et à la technologie pertinente qui se rapportent aux piliers de surface.

- préparer une série de cas résultant de la visite de six (6) mines représentatives.

- évaluer la possibilité d'établir un système de classification des piliers de surface et déterminer les critères généraux de dimensionnement à partir des résultats obtenus au cours des visites.

- définir les exigences de recherche visant au développement de procédures améliorées de dimensionnement, de soutènement et de contrôle des piliers de surface; le tout en s'appuyant sur les nouveaux développements en mécanique des roches appliquée et dans d'autres domaines technologiques pertinents.

Dans le but d'atteindre ces objectifs, le Groupe-Conseil Roche a misé sur trois (3) sources d'informations principales. La première et certainement la plus complexe, est la littérature scientifique écrite sur le sujet. Cette recherche bibliographique permet de constituer une toile de fond sur laquelle viendra se greffer le " know how" des opérateurs obtenu à partir des visites de mines, ce qui constitue la seconde source de renseignements. Enfin, nous comptions beaucoup sur l'expérience et la compétence personnelle de chacun des membres de l'équipe de travail.

1.2 EQUIPE DE TRAVAIL

Au cours de cette étude, nous avons considéré essentiel de travailler en collaboration avec les gens de l'industrie et d'associations représentatives. Pour ce faire, des représentants de ces secteurs ont été regroupés en un comité consultatif formé dans le but de recueillir les opinions sur la question et d'orienter l'étude vers les domaines les plus pertinents. Ce comité était composé de membres des organismes décrits à la figure 1.1.

Les deux (2) conseillers qui ont participé à l'étude, avaient pour mandat de fournir une appréciation générale sur le déroulement du projet, de participer à l'élaboration du plan de travail et au besoin de porter un jugement critique sur les rapports produits. Chacun d'eux devait plus particulièrement insister sur les aspects reliés à leur sphère de spécialisation.

À l'intérieur du Groupe-Conseil Roche, plusieurs personnes ont été impliquées dans l'étude à différents niveaux de réalisation.

1.3 PROFIL DU RAPPORT

Le rapport final sur " l'état de la question sur le dimensionnement et la stabilité des piliers de surface" vient compléter une série de rapports d'étapes soumis à la fin des trois (3) principales parties de l'étude soit: la problématique, la recherche bibliographique et la visite des mines.

La forme de ce rapport final se présente donc comme suit:

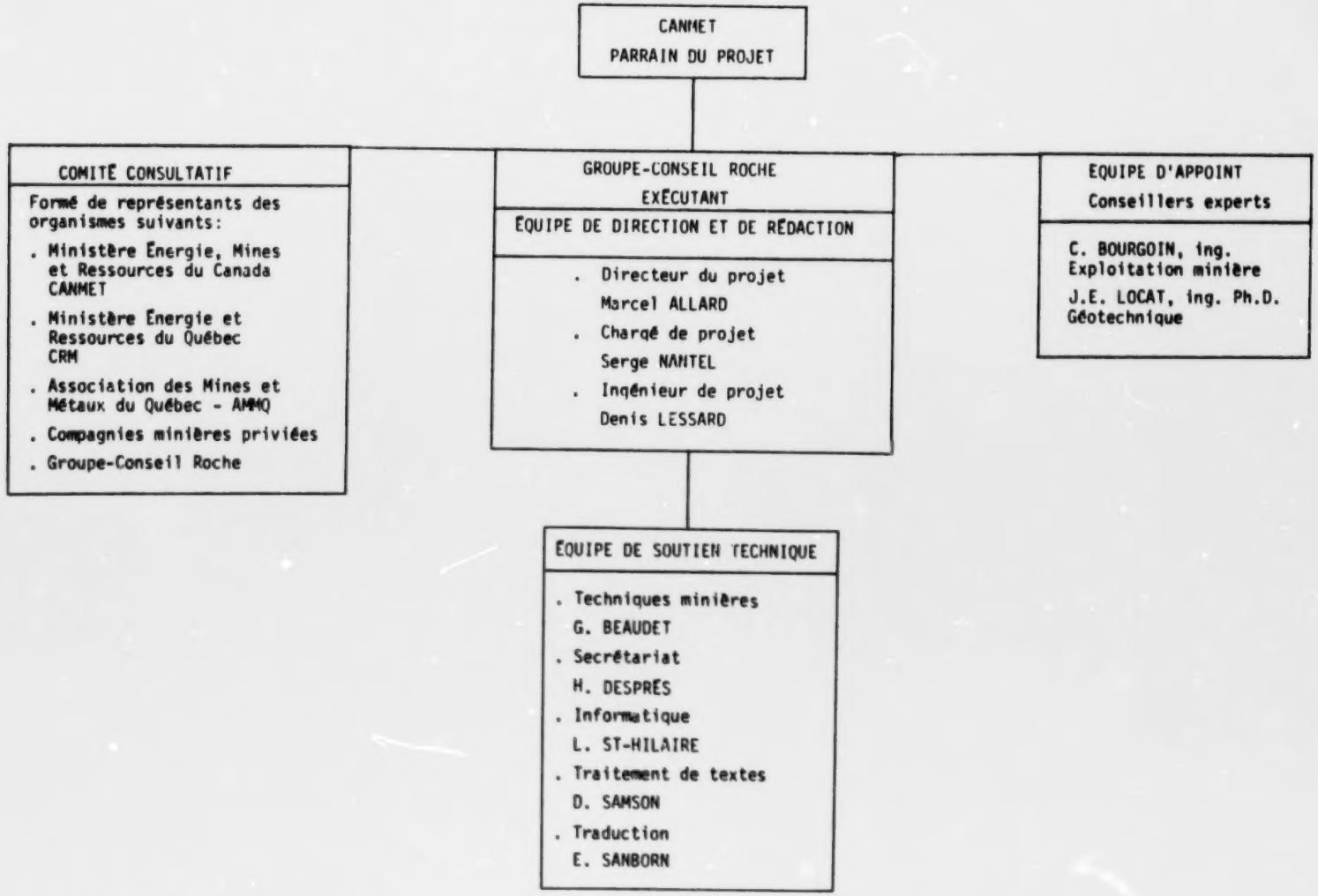


FIG. 1.1 ORGANIGRAMME DU PROJET DES PILIERS DE SURFACE

I- INTRODUCTION

Dans laquelle les auteurs situent le problème, définissent le mandat et l'équipe de réalisation.

II- TERMINOLOGIE

Ce chapitre relate les principaux termes utilisés dans la littérature et dans l'industrie minière pour désigner les divers piliers de mines, incluant les piliers de surface. À défaut d'une définition de ces derniers, nous en avons proposé une qui semblait satisfaire les principaux intervenants dans ce projet.

III- RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans cette section, seront exposés les éléments les plus pertinents tirés de la revue de la littérature sur le sujet. Le produit de la recherche est une liste bibliographique des auteurs classés par ordre alphabétique dont les articles correspondant sont caractérisés par un code alpha-numérique, de façon à pouvoir en saisir facilement le contenu.

IV- VISITE DES MINES

Ce chapitre contient un tableau descriptif qui illustre la somme de travail effectué dans les mines concernant les piliers de surface. Nous avons tenté de mettre en relief les éléments originaux rencontrés à chaque opération.

V- DISCUSSIONS

Après les chapitres beaucoup plus descriptifs qu'analytiques, celui-ci fait la synthèse entre ce qui se fait dans nos opérations minières et ce qui a été écrit sur le sujet. En fait, il situe nos mines dans un contexte beaucoup plus général, souligne les points forts et faibles des procédures utilisées dans nos opérations minières pour concevoir et contrôler la stabilité des piliers de surface.

VI- RECOMMANDATIONS

Par rapport à un cas idéal traité selon un cheminement élaboré à partir des meilleurs éléments rencontrés, soit dans la littérature, soit au moment des visites de mines, cette section dégage les recommandations nécessaires afin d'accroître l'efficacité du " design" des piliers de surface.

VI- MODALITÉS D'APPLICATION DES RECOMMANDATIONS

Nous suggérons dans cette partie finale de l'étude, un ordre de priorité d'application des recommandations de l'étude.

. ANNEXE 1

Nous retrouvons à l'annexe 1 une synthèse de la terminologie utilisée dans la littérature consultée et dans les mines visitées.

. ANNEXE 2

Cette annexe contient les détails concernant les méthodes utilisées au cours de la recherche bibliographique,un inventaire de la recherche ainsi que la liste codifiée des articles sélectionnés.

. ANNEXE 3

Les comptes-rendus détaillés des six (6) histoires de cas figurent à cette annexe. Chaque rapport de visite est présenté selon un plan descriptif commun.

II- TERMINOLOGIE

Avant de poursuivre plus avant, nous croyons qu'il est important de préciser dès maintenant la signification du terme " PILIER DE SURFACE" . Une première observation intéressante qui découle de notre revue de la littérature est l'absence presque totale de termes désignant les piliers de surface. En fait, la presque totalité des ouvrages consultés ignorent ce type de pilier pour ne détailler que ceux soutenant les planchers et plafonds des chantiers souterrains. La littérature anglaise mentionne fréquemment l'expression " crown pillars" qui sont en fait des piliers horizontaux laissés dans le haut des chantiers; par extension, le premier pilier horizontal du haut de la mine est celui qui nous intéresse présentement.

Par ailleurs, la littérature européenne (française) est déjà plus spécifique car elle parle de " stot" comme d'une zone de roche, minéralisée ou non, laissée en place autour d'une ouverture afin d'en assurer la stabilité. Encore là, il n'y a pas de correspondance directe avec l'expression " pilier de surface" , mais l'on se rapproche de la définition idéale.

Pas plus que dans la littérature, la direction des mines visitées n'utilise une terminologie uniforme des piliers de surface. L'on notera cependant que les termes " pilier de surface" et " surface pillar" , sont utilisés dans quatre (4) des six (6) mines visitées, comme le démontre le tableau 1.1 présenté à l'annexe 1 de ce rapport. Parmi les nombreux termes se rattachant aux piliers, le pilier de surface est généralement désigné par les expressions suivantes:

Pilier de surface - surface pillar
Pilier de couronne - crown pillar
Stot de protection -

Le personnel rencontré aux mines utilise souvent de manière indistincte l'un ou l'autre de ces termes, tantôt en français, tantôt en anglais. Comme il n'existe pas de réelle standardisation acceptée par l'ensemble des opérateurs, nous avons cru utile de proposer le terme et la définition suivante:

Pilier de surface:	masse rocheuse de géométrie variable, minéralisée ou non, située au-dessus de(s) excavation(s) supérieures de la mine, utilisée pour assurer de façon permanente ou temporaire la stabilité des éléments de surface.

La figure 1.1 complète notre définition en illustrant une forme simplifiée de pilier de surface.

Cette définition a été soumise et discutée devant le comité consultatif qui semblait en accord avec la nécessité de bien définir les termes avant de poursuivre l'étude. Dans cette optique, nous proposions au personnel des mines visitées, l'utilisation de l'expression " pilier de surface" , avec la signification que nous venons d'énoncer. Elle semblait concorder avec ce qu'eux-mêmes intuitivement, définissaient comme le pilier de surface. Tous étaient d'accord avec la notion de stabilité et de sécurité implicitement incluse dans celle-ci.

Comme complément d'information, nous avons défini et illustré les autres variétés de piliers de mine rencontrées au cours de cette étude. Elles sont regroupées à l'annexe 1 de ce rapport.

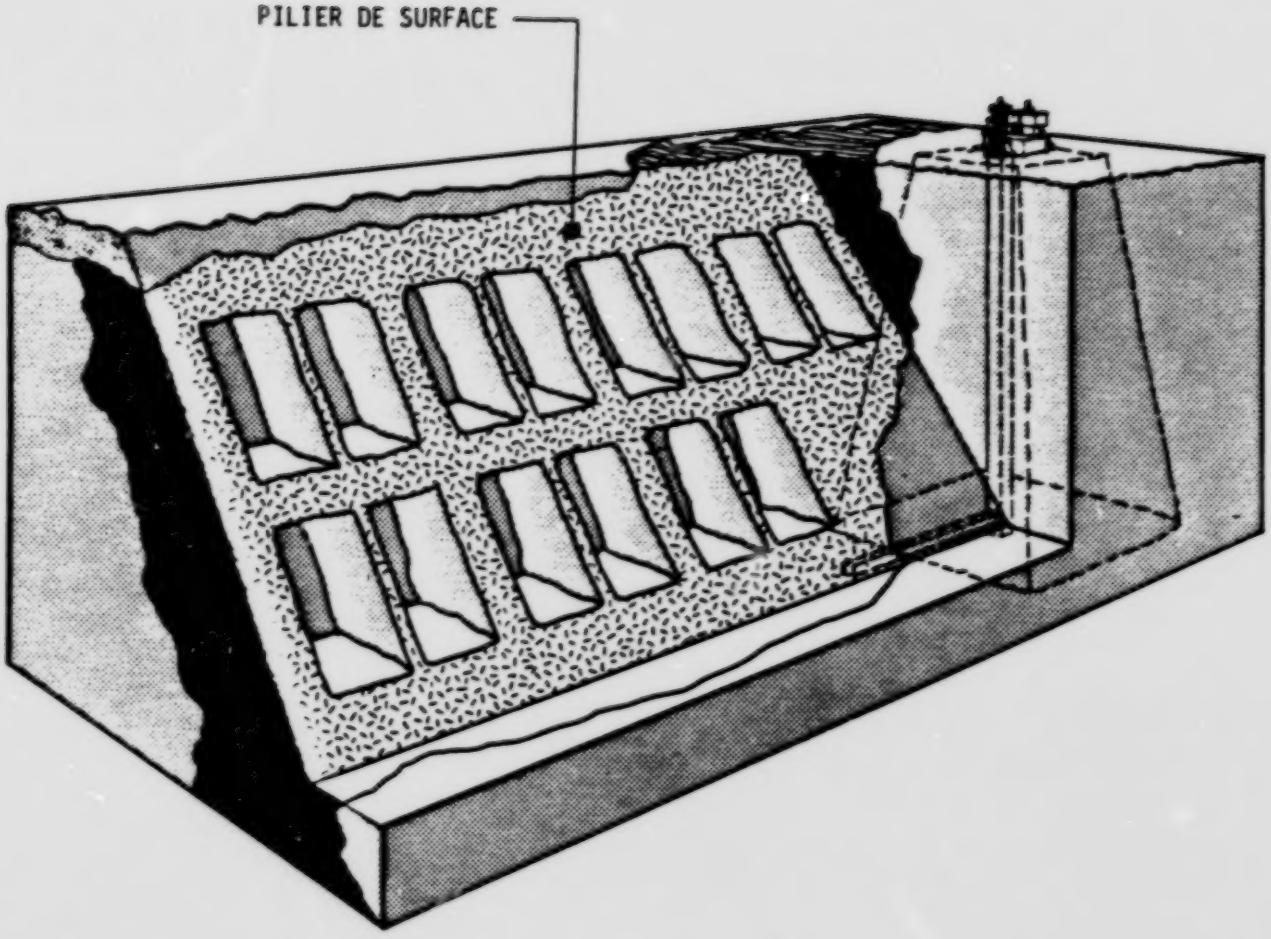


FIG. 1.1 PILIER DE SURFACE

III- RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Tel que mentionné précédemment, le but de la recherche bibliographique était de constituer une banque de données susceptibles de préciser la question du dimensionnement et du contrôle de la stabilité des piliers de surface.

Cette recherche a été menée de façon conventionnelle, utilisant à la fois les ressources disponibles dans les bibliothèques scientifiques locales ainsi que celles contenues dans les banques informatisées nord-américaines. Dans le cas présent, l'utilisation de l'informatique a été plus qu'utile car cette technologie de pointe nous a permis un accès rapide et efficace à un grand volume d'informations autrement impossible à vérifier.

Notre recherche bibliographique comprenait les étapes suivantes:

. familiarisation avec les termes utilisés
. choix des mots-clés
. recherche des ouvrages pertinents
. obtention des documents
. classification des articles
. création d'une liste bibliographique
. codification des documents.

Ces différentes phases de l'étude sont décrites plus en détails à l'annexe 2 du présent rapport. Soulignons simplement que le résultat pratique de la recherche bibliographique est la liste alphabétique codifiée des documents pertinents au sujet étudié. Cette liste permet

d'identifier rapidement le contenu et la qualité de chacun des articles retenus. À titre d'exemple, la référence montrée ci-dessous illustre l'intérêt de l'utilisation d'une grille de codification et sa modalité d'application.

Référence:

3- ALLCOTT, G.A., ARCHIBALD, D.E. 1981

DESCRIPTION OF PILLAR BEHAVIOUR AT HEATH STEELE MINES,CIM BULLETIN, VOL/ 74, NO. 834, PP. 80-87.

1A 2B 3D 4B --- 6A 7B --- 9C 10C --- --- --- ---

À l'aide du tableau 2.3, présenté à l'annexe 2, il nous est possible de savoir que l'article:

1A- traite d'un sujet canadien

2B- qu'il s'agit d'une histoire de cas

3D- qu'il n'y a rien au-dessus de cette mine

4B- que les critères de rupture utilisés le sont pour les piliers en général

6A- que l'article discute de la mesure des contraintes et déformations au niveau des piliers

7B- que la méthode d'évaluation de la stabilité est du type analytique

9C- qu'il s'agit d'un gisement tabulaire incliné à plus de 45° par rapport à l'horizontal

10C- que Heath Steele est une mine de métaux

3.1 CLASSIFICATIONS DES PILIERS

Il n'existe pas dans la littérature étudiée de méthode de classification des piliers de surface. Par contre, nous avons retenu deux (2) approches de classification des piliers verticaux souvent utilisées dans les mines de charbon et les mines métalliques.

La première approche est abondamment illustrée par de nombreux auteurs dont Hedley et al. (1979), Coates (1981), et Tincelin (1982). Elle relie la résistance d'un pilier à des facteurs tels que: le rapport "plus petite largeur" sur hauteur, le volume du pilier, l'angle des discontinuités majeures par rapport à l'axe du pilier, la forme circulaire, rectangulaire, etc. Il s'agit là d'une approche géométrique très répandue et utilisée en première analyse pour concevoir ce genre de pilier.

Par contre, la deuxième approche est essentiellement basée sur l'optimisation des connaissances du massif rocheux dans lequel les piliers seront taillés. Cette approche est décrite par Hoek et Brown (1980), Bieniawski (1983, 1979, 1974), Laubscher (1977). Ces auteurs fournissent des tableaux ou abaques qui permettent de classer les piliers en fonction de la qualité du massif qui les composent. Avec les progrès de la technologie, ces classifications deviennent de plus en plus raffinées afin de mieux répondre aux problèmes pratiques. Elles fournissent enfin, des indications sur la stabilité des piliers, les types et la quantité de support requis dans telle ou telle application, etc. De telles indications de comportement sont basées sur un grand nombre de données recueillies dans différents types de mines ou de tunnels et sur l'expérience pratique des chercheurs eux-mêmes. Le tableau 3.1 représente les principales classifications géomécaniques disponibles présentement.

Soulignons que les auteurs sont représentés selon un ordre chronologique approximatif.

Cette dernière approche est intéressante parce qu'elle peut-être appliquée de façon répétitive en éliminant le plus possible la subjectivité de l'évaluation.

TABLEAU 3.1 CLASSIFICATIONS GEOMECANIQUES (LEGAST, 1981: DISSERTATION ON BLOCK CAVING, McGILL UNIVERSITY, MONTREAL)

	(ROUGH CHRONOLOGICAL ORDER)	1 TERZAGHI .	2 LAUFFER .	3 ONODERA .	4 COATES & PARSONS	5 BURTON	6 DEERE et al	7 DEERE & MILLER .	8 HANDIN .	9 STAPLEDON .	10 BRIOLI .	11 GOODMAN	12 McMAHON et al	13 PÖELLER	14 WICKHAM et al	15 BIENIAWSKI (1973)	16 LAUBSCHER	17 BARTON et al (1974)	18 TAYLOR
DEFORMATION OF CHARACTERISTICS					X														
STRENGTH OF ROCK MATERIAL	UNIAXIAL COMPRESSIVE				X	X		X		X				X		X	X	STRESS REDUCTION FACTOR	X
	DEGREE OF LOOSENING										X								
	MOD. OF ELASTICITY			X				X											
WEATHERING				X												X†	†		†
DISCONTINUITIES	R.Q.D.						X						X			X	X	X	X
	NO OF SETS		VAGUELY DEFINED			X									X		X	X	X
	SPACING				X						X			X	X	X	X		X
	CONTINUITY														X	X	•		•
	CONDITION .											X			X	X (1)	X	X	X
	STRIKE / DIP ORIENTATION														X	X	†		†
WATER INFLOW															X	X	X	X	X (2)
STAND UP TIME			X																
GROSS HOMOGENEITY					X														
LITHOLOGY					X				X						X				
ROCK LOAD		X															†	X	†

SUMMARY OF PARAMETERS USED IN ROCK MASS CLASSIFICATIONS

- . Quoted by John
- † Adjustment
- (1) Joint separation, originally separate parameter
- (2) Included with joint condition
- • Implied

3.2 MÉTHODES DE CONCEPTION

Près des deux (2) tiers des articles retenus parlent des méthodes d'évaluation de la stabilité des piliers en général. Les dimensions de ceux-ci découlent d'un diagnostic basé sur plusieurs paramètres et la stabilité représente la première condition à remplir au moment de leur conception. Ainsi certains auteurs présentent-ils des guides de conception dans lesquels sont indiquées les étapes de réalisation du " design" d'un pilier; Duvall (1977) énumère neuf (9) paramètres importants; Gill (1981) présente un cheminement interactif (fig. 3.1); Parker (1983) ramène la conception des ouvrages à quatre (4) grandes étapes, Pariseau (1975) introduit la notion de coûts des études, enfin Brissenden (1980) discute de la conception au sens large du terme.

Dans tous ces articles, il y a une notion qu'il faut retenir. Les méthodes de conception proposées se divisent en trois (3) phases soit:

- évaluation de la capacité du pilier, de sa résistance aux sollicitations.
- détermination des contraintes qui agissent en un point du massif, sur le pilier en question.
- comparaison entre les deux (2) ensembles de valeurs à l'aide d'équations d'équilibre.

La plupart des auteurs discutent du problème classique de la mécanique des roches qui consiste à transposer les résultats obtenus en laboratoire à l'échelle du terrain. Duvall (1977) parle de l'effet de forme, ou " shape effect" , Tincelin et Riveline (1965) de la variation des résultats des essais en fonction de la dimension des échantillons et de la variation négative de la résistance des roches avec le temps, pour ne citer que ces auteurs, parmi la liste nombreuse de ceux-ci. Cela est

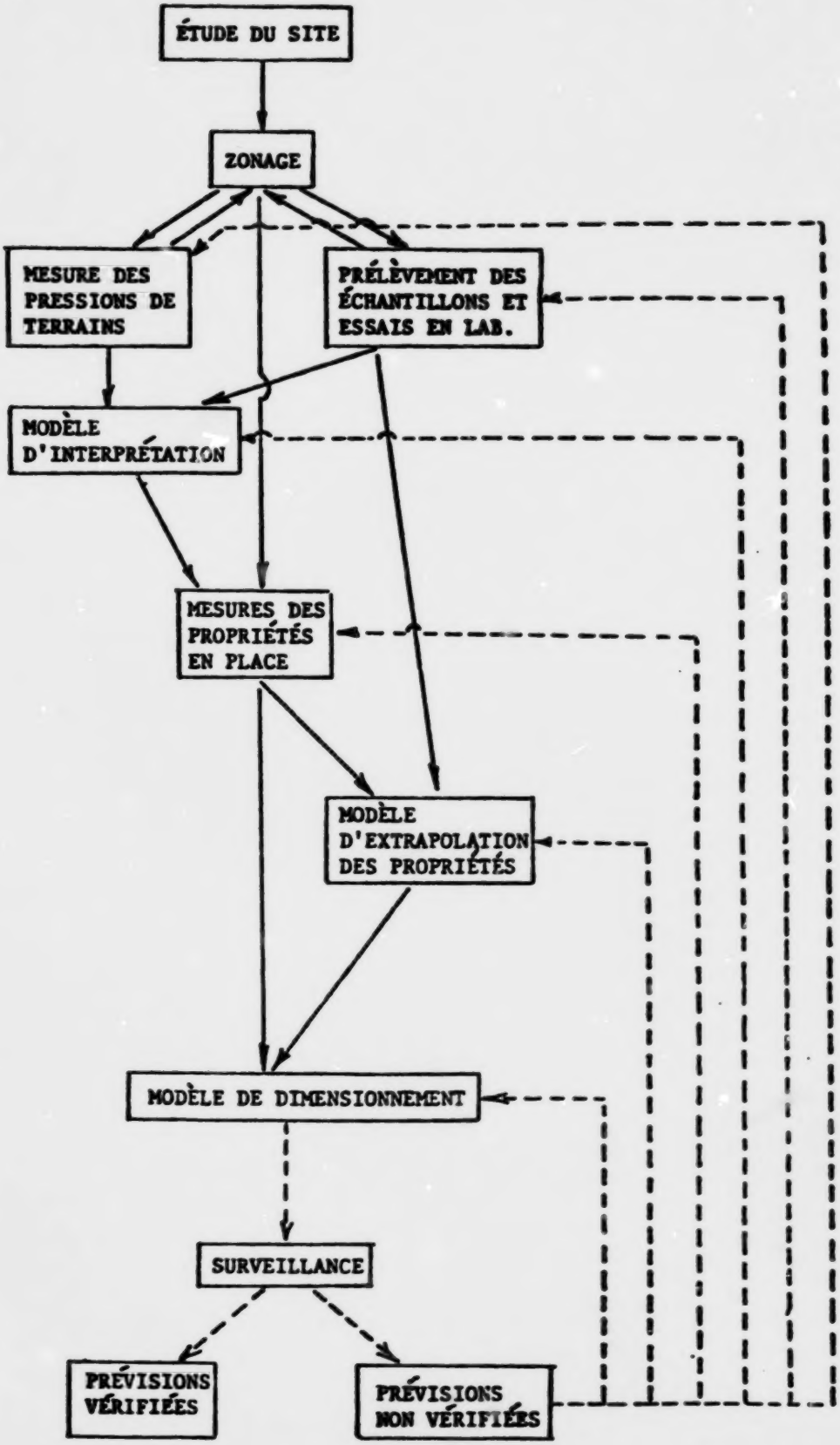


FIG. 3.1 - MÉTHODOLOGIE DE DESIGN EN MECANIQUE DES ROCHES
Référence tirée de Gill (1981)

particulièrement vrai lorsque nous traitons le cas d'un massif non élastique et non homogène où la structure joue un rôle prépondérant dans la stabilité.

Dans cet ordre de pensée, puisqu'il est rare de rencontrer dans la réalité des massifs parfaitement homogènes, facilement quantifiables par une série d'équations, l'on retrouve une école de pensée qui appuie son évaluation sur un ensemble de caractéristiques, contribuant de façon inégale à définir la capacité de support d'un massif rocheux.

Mais avant de poursuivre, mentionnons que dans le cas des dépôts de charbon et de schistes bitumineux, il semble que la nature plus ou moins plastique de ces matériaux permette l'utilisation de relations simples entre les résultats de laboratoire et le comportement réel du massif. Ce qui n'est pas le cas dans la majorité des mines de métaux et plus particulièrement près de la surface où les massifs sont habituellement très fracturés.

Page et Brennen (1983), Bieniawski (1983), Barton et al. (1974), Hoek et Brown (1980) ou Duncan et Devane (1983) orientent donc la recherche vers l'analyse des variables susceptibles de contribuer à définir le plus fidèlement possible la résistance de ces massifs à joints. Souvent issues des travaux de génie civil ces techniques sont de deux (2) ordres.

La première regroupe l'ensemble des classifications géomécaniques qui s'appuient sur l'analyse du comportement " in situ" de nombreux massifs préalablement catalogués. De ces constatations, les auteurs tirent un ensemble de conclusions reliées à la stabilité de ces mêmes massifs.

Il suffit alors de revenir aux critères de classifications, de les appliquer de façon objective et répétitive pour obtenir une évaluation de la zone rocheuse étudiée, correspondant à une classe précise, à laquelle sont associées des caractéristiques et un comportement vérifié par l'expérience.

La deuxième approche, celle entre autre de Duncan et Devane (1983), Page et Brennen (1983), Hoek et Brown (1980) est plutôt basée sur l'hypothèse qu'il est effectivement possible d'adapter les valeurs obtenues en laboratoire, au massif rocheux. Chacun de ces auteurs propose des facteurs de correction tenant comptent de plus ou moins d'éléments. Nous discutons plus en profondeur de ces facteurs de correction à l'annexe 2 de ce rapport.

La détermination des contraintes qui agissent sur les piliers est souvent simplifiée au maximum dans les méthodes analytiques de calculs. Il est fréquemment question de la théorie de la surface tributaire où les contraintes sont réparties proportionnellement entre les piliers. Cette technique était jusqu'à récemment la plus répandue. De nos jours, une nette tendance se dessine vers l'utilisation de méthodes numériques, faisant appel aux techniques d'analyse par éléments finis. Mathews et al. (1983) utilisent cette méthode pour obtenir la répartition et la grandeur des contraintes dans le massif étudié en fonction de la géométrie des chantiers, de leur position respective, de la présence de failles majeures modifiant le champ théorique uniforme de ces contraintes. Hedley et al. (1979) ont utilisé une technique similaire pour évaluer la stabilité de la mine Kidd Creek et le pilier de surface laissé entre le fond de l'ancien puit à ciel ouvert et la mine souterraine. Une dizaine d'articles traitent de l'application de ces méthodes numériques.

L'étape suivante du processus de conception consiste à confronter entre eux les deux (2) éléments que les auteurs ont tenté de définir: la résistance du massif et les forces qui agissent sur ce dernier. Duvall (1977) parlera d'employer la théorie de la poutre (" beam theory"), Hoek et Brown (1980) se limitent à vérifier si la résistance du massif est inférieur, égale ou supérieure aux contraintes qui existent en divers points de ce dernier. Enfin, les partisans des classifications géomécaniques évaluent la stabilité par association entre la roche à estimer et le comportement connu d'un massif de caractéristiques équivalentes.

Il est malheureux de dire que nous avons retrouvé très peu d'applications de ces méthodes de conception au niveau des piliers de surface dans les mines de métaux. Les études de cas dans ce domaine ont été réalisées par Page et Brennen (1983); Hanninen et al. (1973) dans le cas d'un gisement sédimentaire horizontal; Southey (1969) présente l'histoire de cas d'une mine de fer sous-marine dans laquelle le dimensionnement du pilier de surface a été fait vraiment selon des critères très subjectifs; Tincelin (1982) présente une approche théorique qui tente d'expliquer diverses situations rencontrées dans les mines métalliques exploitées par chambres et piliers; Touseull et Rich (1980) relatent et analysent à rebours un cas d'effondrement; enfin, Hedley et al.(1979) décrivent le comportement de Kidd Creek.

3.3 FACTEURS DE SÉCURITÉ

Nous retrouvons dans la littérature la notion de facteur de sécurité. C'est une pratique courante dans le domaine du génie civil que de concevoir un ouvrage 1.2 à 1.5 fois plus résistant que requis en pratique. Dans le secteur minier cette notion est utilisée afin de compenser notre ignorance des caractéristiques réelles du massif évalué.

Devant la difficulté à définir exactement la valeur de la résistance d'un massif quelconque, plusieurs auteurs utilisent pour la conception des piliers, la résistance de la roche obtenue en laboratoire, divisée par un facteur de correction que l'on veut représentatif du milieu. Ainsi Duvall (1977) utilise un facteur situé entre 4 et 8 pour la résistance en tension et entre 2 et 4 pour la résistance en compression de la roche. Goodman et al. (1980), même après avoir appliqué à la valeur de laboratoire des corrections liées à la forme et aux dimensions des piliers, divisent la valeur obtenue par un facteur F, variable selon le contexte.

La pratique est donc d'utiliser le facteur de sécurité comme un outil de compensation servant à combler les lacunes de l'analyse quantitative du massif évalué. Cette notion de facteur de sécurité est reprise plus en détails à l'annexe 2 et tend à démontrer que le F.S. ne peut être perçu comme représentatif du degré de confiance accordé à un ouvrage.

3.4 ÉQUATIONS DE DIMENSIONNEMENT

Pour les piliers de mines en général, et surtout pour ceux des mines de charbon, il existe une vaste documentation qui relie la résistance d'un pilier à sa forme. C'est ce que nous avons appelé les équations de dimensionnement et que nous discutons à fond à l'annexe 2.

Ces équations sont extrêmement pratiques et se présentent habituellement sous cette forme:

$$\boxed{\text{résistance du pilier}} = \boxed{\text{facteur de corrélation} \times \frac{\text{largeur du pilier}}{\text{hauteur du pilier}}}$$

Il est donc relativement facile de déterminer la forme des piliers, selon la résistance que nous désirons obtenir de ceux-ci, en fonction des forces qui s'appliquent à tel ou tel endroit de la mine. Dans le cas des mines métalliques Hedley et al. (1972) ont proposé des équations similaires.

Cependant aucun auteur ne mentionne de formule de ce genre qui puisse permettre de définir en première analyse les dimensions d'un pilier de surface. Les seules équations rencontrées sont utiles pour évaluer la résistance d'un point dans le massif en fonction des contraintes qui s'y appliquent, tel que discuté à la section 3.1. Il faut alors procéder par essais et erreurs pour obtenir les dimensions de notre pilier ou encore employer les théories de la poutre ou de l'arche pour définir ces paramètres.

3.5 PROGRAMME DE SURVEILLANCE

Parmi les articles sélectionnés, environ 20 % traitent spécifiquement des déformations des piliers et un autre 20 % traitent des déformations en général.

Dans le cadre des programmes de surveillance des travaux miniers, des extensomètres ou des potentiomètres linéaires sont utilisés pour détecter les mouvements des murs, plafonds ou planchers (Thian, 1983; Alexander et al., 1981; Barrett et al., 1979; Hedley et Wilson, 1975).

En plus de mesurer les déformations et d'assurer un contrôle de la stabilité, le programme de surveillance par instrumentation pourrait servir à vérifier les données théoriques prédites avant l'exploitation minière.

Le suivi des déformations dans un chantier permet d'observer l'évolution des conditions locales et possiblement de prédire si une rupture se produira dans un avenir plus ou moins rapproché. Des cellules de chargement peuvent être placées dans des endroits stratégiques pour déterminer les contraintes in situ . Barrientos et Parker (1974) analysent les données obtenues à partir d'une douzaine de piliers instrumentés: ces auteurs constatent que les contraintes mesurées dans les piliers partiellement dépilés sont inférieures à celles prédites par les calculs théoriques. Ils expliquent cela par l'effet d'arche qui répartit les contraintes aux extrémités des chantiers.

Les mesures d'affaissement en surface représentent pratiquement la seule instrumentation du pilier de surface. Tincelin (1982), Singh (1979), Dejean et Arcamone (1979) et Orchard (1969) ont étudié ou évalué les tassements de piliers de surface induits par l'extraction minière souterraine. Cet intérêt pour les tassements est surtout commandé par des contraintes physiques telles des infrastructures en surface, barrage, nappes d'eau...

Une autre méthode de surveillance des chantiers souterrains est l'utilisation d'instruments de géophysique pour détecter les microséismes ou les bruits provoqués par des ruptures dans le massif rocheux (Leighton, 1983; Gibbons, 1980; Hedley et al., 1979). L'enregistrement des bruits du massif rocheux peut aider à prévenir un accident: l'amplitude et la fréquence des microséismes sont des paramètres qui peuvent être utilisés pour évaluer la stabilité des chantiers, détecter les zones critiques et permettre d'apporter les correctifs nécessaires.

3.6 RÉGLEMENTATION

L'un des buts de notre mandat était de procéder à un inventaire de la littérature traitant de la "réglementation" appliquée spécifiquement aux piliers de mine. Dès le début de notre recherche bibliographique, nous avons retracé un texte publié en janvier 1983, par la " Commission d'Enquête sur la tragédie de la mine Belmoral et les conditions de sécurité dans les mines souterraines" . Dans le volume 3 intitulé "La sécurité dans les mines souterraines" , l'on retrouve un chapitre complet dédié à cet aspect de la question.

À titre d'information, voici un extrait de cet ouvrage; il s'agit de l'introduction au chapitre 2, page 51, de la réglementation en vigueur dans nos mines canadiennes ainsi qu'aux États-Unis:

" Dans la poursuite de nos objectifs, il a paru nécessaire à la Commission de faire une étude de la législation et de la réglementation minière en vigueur au Québec, dans les autres provinces canadiennes et aux États-Unis. L'étude porte uniquement sur la réglementation applicable aux mines souterraines de métaux métalliques et non-métalliques" .

" Les principaux aspects analysés sont les suivants: pilier de surface, travaux sous un terrain aquifère ou sous une nappe d'eau, travail seul, éclairage sous terre, communications avec la surface, exploration de la surface, sorties de secours, accès aux chantiers, auto-évacuation, refuges, contrôle du terrain, formation des mineurs et voies de roulage. La forme, le contenu et le pouvoir coercitif des règlements ont attiré plus particulièrement notre attention. Cette étude démontre que l'ensemble de la réglementation minière applicable aux mines souterraines comporte certaines caractéristiques communes" .

Parmi les quatre (4) caractéristiques communes aux réglementations, l'une d'elle mérite d'être citée:

" La troisième caractéristique de la réglementation minière consiste dans l'absence totale de normes explicites relativement à certains aspects de l'activité minière reliés à des questions d'ingénierie, comme le dimensionnement du pilier de surface d'une mine souterraine, ..." (p. 51, Commission, volume 3, 1982).

L'étude de la Commission démontre clairement que dans la majorité des législations étudiées, la réglementation tient compte de cas d'exception selon les circonstances rencontrées dans telle ou telle exploitation et rédigées " comme s'il était impossible de formuler des standards applicables à l'ensemble de l'industrie minière", (p. 51, Commission, volume 3, 1982).

Parmi les autres textes, Riddle (1980) discute des règlements du " Surface Mining Control and Reclamation Act" (États-Unis). Ce texte traite en détail des problèmes causés par la subsidence, mais il ne s'applique qu'aux mines de charbon. Il ne représente donc pas d'intérêt pour nous.

De nombreux autres auteurs parlent de guides pratiques d'extraction (Orchard, 1969; Hedley et al., 1979; Bieniawski, 1983) et parfois résument les lois pertinentes (Skelly et Loy, 1976) mais toujours dans le domaine des exploitations de charbon.

Il apparaît actuellement, qu'aucune législation ne peut servir de guide ou éclairer les opérateurs de mines de métaux dans la conception des piliers de surface.

IV- VISITES DES MINES

Ce qui se dénote le plus en révisant les rapports de visite, c'est la quantité assez importante de données recueillies sur le thème des piliers de surface. Cependant, elles ne sont pas toutes de valeur égale d'une mine à l'autre. Dans le but de faire ressortir cela, nous avons construit plusieurs tableaux thématiques. À l'intérieur de ceux-ci, nous avons établi une pondération relative des travaux effectués à chaque mine, sans juger si ceux-ci étaient adéquats ou non, essentiels ou superflus pour l'étude d'un pilier de surface. Cette pondération ne tient donc pas compte des besoins spécifiques à chaque opération. En effet, telle compagnie peut avoir besoin de connaître à fond la composition et le comportement du mort-terrain qui recouvre son pilier de surface, alors que pour une autre, il sera primordial de bien apprécier le réseau hydrogéologique.

La pondération doit plutôt permettre au lecteur de sélectionner les comptes-rendus de visites susceptibles de lui fournir le maximum d'informations sur un aspect précis de la question. Les symboles utilisés dans le tableau subséquent illustrent cette pondération de la façon suivante:

- ○ Travaux peu élaborés
- ◑ Moyennement élaborés
- ● Très détaillés
- ▬ Aucun travail / Ne s'applique pas

TABLEAU 4.1 RÉSUMÉ DES TRAVAUX TOUCHANT LES PILIERS DE SURFACE

TRAVAUX	MINE NUMÉRO 1	2	3	4	5	6
HYDROGÉOLOGIE						
. Évaluation visuelle	○	▬	▬	▬	○	○
. Analyse spécifique	▬	◑	◑	●	▬	▬
CONDITIONS DE SURFACE						
. Enlèvement du sol	▬	▬	◑	▬	▬	▬
. Drainage	▬	◑	◑	●	▬	▬
. Trous de forage	▬	◑	◑	●	▬	○
. Analyse de laboratoire	◑	◑	○	●	▬	▬
. Mise en plan	○	◑	◑	●	○	○
. Méthode sismique	▬	▬	▬	○	▬	◑
MODÉLISATION, SIMULATION						
. Modèle numérique	▬	▬	◑	◑	▬	◑
. Simulation	▬	▬	▬	▬	▬	▬
MÉCANIQUE DES ROCHES						
. Programme interne	◑	◑	◑	●	◑	◑
. Études extérieures	▬	○	◑	○	▬	◑
. Essais en laboratoire	▬	▬	○	○	▬	▬
SOUTÈNEMENT DU/DES PILIER(S) DE SURFACE						
. Boulons conventionnels	▬	◑	◑	▬	◑	◑
. Tiges cannelées et cimentées	▬	◑	●	▬	▬	▬
. Tiges d'acier et résine	▬	▬	▬	▬	▬	●
. Remblai en vrac	▬	▬	▬	▬	▬	▬
. Remblai hydraulique	▬	●	▬	▬	▬	▬
. Remblai consolidé	▬	▬	◑	▬	▬	●
. Câbles cimentés	▬	▬	▬	▬	▬	●
. Injection de ciment seul	▬	◑	▬	▬	▬	▬
INSTRUMENTATION, CONTRÔLE DE LA STABILITÉ						
. Mesure des déplacements	○	▬	▬	●	▬	●
. Mesure des contraintes "in situ"	▬	▬	▬	▬	▬	○
. Inspection visuelle classique	○	◑	○	○	○	○
. Inspection systématique	◑	●	●	▬	▬	▬
ÉVALUATION DU MASSIF ROCHEUX						
. Classification intégrée	●	○	○	◑	▬	○
. Type de roche	▬	◑	▬	▬	▬	▬
. Structure	▬	▬	○	◑	◑	○
. R.Q.D.	▬	▬	○	▬	◑	●

Nous avons établi une pondération relative des travaux effectués à chaque mine, sans juger si ceux-ci étaient adéquats ou non, essentiels ou superflus pour l'étude d'un pilier de surface.

○ Travaux peu élaborés
◑ Moyennement élaborés
● Très détaillés
▬ Aucun travail / Ne s'applique pas

Le tableau 4.1 de la page précédente résume les divers travaux réalisés au niveau des piliers de surface dans les six (6) mines visitées . Il est important de noter que parmi les opérations évaluées, une seule est actuellement au stage de la conception de son pilier de surface. Les autres ont depuis longtemps terminé l'exploitation de leurs chantiers supérieurs.

Les visites nous ont fourni une foule de données intéressantes, amplement détaillées à l'annexe 3, qu'il est possible de regrouper de la façon suivante:

- trente (30) ensembles de valeurs géométriques sur les dimensions de piliers existants et qui en première analyse, démontrent que les piliers stables ont un rapport entre leur épaisseur et leur largeur d'au moins de deux (2); alors que ceux qui se sont effondrés (mine no 5) avaient un rapport de un (1). Le tableau 4.2 résume ces valeurs.

- un aperçu des méthodes utilisées dans le passé pour dimensionner les piliers de surface et en évaluer la résistance. Ces méthodes font habituellement appel à l'expérience des opérateurs, acquise au cours du minage de zones ayant des caractéristiques similaires à celles du pilier de surface.

- un tour d'horizon des moyens employés pour vérifier et assurer la stabilité des piliers à long terme. Il s'agit surtout d'inspections visuelles de routine, de l'utilisation de remblai et de support artificiel sous le pilier de surface. Dans nos mines, peu d'instruments de mesure sont par contre utilisés.

TABLEAU 4.2 : GEOMETRIE DES PILIERS DE SURFACE

PILIERS DE SURFACE	MINE NO 2							MINE NO 3									MINE NO 4				MINE NO 5						MINE NO 6			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
- Longueur (m)	61	46	61	107	76	84	79	38	61	30	43	40	30	-	37	-	30	48	22	22	50	56	58	58	59	58	250	250	250	250
- Largeur (m)	5	21	9	9	12	5	6	2	15	6	6	4	3	3	5	3	22	22	15	15	17	18	15	18	17	21	40	40	45	40
- Epaisseur (m)	59	49	49	49	58	17	56	8	12	9	14	6	8	9	21	23	35	35	35	35	14	14	14	18	38	25	179	179	179	179
- Hauteur (chantier sous-jacent) (m)	46	46	46	43	40	55	50	46	92	107	-	-	-	-	-	-	20	20	20	20	37	37	37	37	37	37	24	24	24	24
Rapport: épaisseur/ largeur	12	2	5	5	5	3	9	4	0,8	2	2	2	3	3	4	8	2	2	2	2	0,8	0,8	0,9	1	2	1	4	4	4	4
Remarques:																														
lac en surface (épaisseur) (m)	1	12	11	11	12	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	13	13	13
mort-terrain (épaisseur) (m)	3	5	6	6	5	7	3	14	3	-	-	-	-	-	-	-	45	45	45	45	8	8	14	8	8	8	19	19	19	19
résidus de mine (épaisseur) (m)	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
marécage + mort-terrain (épaisseur) (m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
pilier effondré	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	*	*	*	*	*	-	-	-	-
mort-terrain enlevé	-	-	-	-	-	-	-	-	*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- une description des méthodes les plus fréquemment utilisées pour déterminer les caractéristiques des sols situés au-dessus du gisement, le contact sol-roc et le niveau de la table d'eau.

- des renseignements pertinents sur l'application de systèmes d'évaluation du massif rocheux. Sur ce point la mine no 1, illustre de façon claire l'utilité de procéder à une telle évaluation, afin de connaître et de tirer avantage des propriétés d'un massif rocheux.

- un bon exemple, à la mine no 4, d'une forme systématique de la conception d'un pilier de surface, englobant l'analyse de la majorité des aspects reliés au sujet: hydrogéologie, support, méthode de minage, calcul de la stabilité, simulation, etc.

Nous pouvons généralement subdiviser le processus de conception idéal des piliers de surface ou de tout autre élément d'une opération minière en cinq (5) grandes étapes:

1. le stage de l'observation ou si l'on veut de la cueillette des données de base. La définition du problème fait partie de cette phase et sert à préciser le nombre et la nature des éléments requis afin de bien cerner le sujet étudié;

2. la seconde étape du processus englobe toutes les opérations de mesure. Elles servent à quantifier les éléments importants. Dans cette étape, nous procédons à des essais en laboratoire ou " in situ" afin de déterminer les caractéristiques mécaniques du massif, les contraintes environnantes; nous cherchons à préciser certains éléments de l'observation initiale... etc.;

3. les données géométriques du problème sont alors analysées en parallèle avec les résultats des mesures. Il s'agit de déceler les points imprécis et d'établir l'interaction entre ces deux (2) types de données;

4. le stage de la conception va alors se faire en tentant d'incorporer en un tout homogène les éléments recueillis. Le but ultime est en effet de voir comment il est possible de réaliser telle ou telle opération ou excavation, en fonction des contraintes existantes dans le milieu; de voir comment il est possible d'agir sur celui-ci et de finalement comprendre les mécanismes en jeu afin de pouvoir pondérer notre jugement;

5. cette dernière étape a pour principal objectif de vérifier si les résultats obtenus sur le terrain sont conformes aux prévisions. C'est l'étape de la surveillance. Elle permet au besoin d'apporter les correctifs nécessaires.

Cependant, toutes les opérations visitées n'ont pas procédé de cette façon, comme nous l'avons déjà souligné. L'une des conclusions les plus évidentes de cette partie de l'étude est le nombre élevé d'observations et de mesures qui sont disponibles aux mines par rapport au nombre de résultats provenant de calculs mathématiques.

Par rapport au processus idéal que nous venons d'énoncer, nos mines se situent environ à mi-chemin. C'est-à-dire, qu'elles ont accumulées beaucoup de données de terrain sans pouvoir vraiment les intégrer en un tout cohérent. Sauf à la mine no. 4, aucune autre opération ne nous a fourni de cheminement précis devant conduire à la conception d'un couvert de protection.

Nous aurions aimé voir les mines tenir des dossiers spécifiquement destinés aux piliers de surface, dans lesquels auraient été regroupées toutes les informations pertinentes. Malheureusement, ceux-ci n'existent pas dans les mines visitées. Il nous a semblé que le passage entre l'observation et la conception " scientifique" d'un pilier de surface ne se fait pas.

Cette lacune ne change souvent en rien la stabilité des piliers de surface mais place les opérateurs dans l'impossibilité de préciser la valeur exacte des facteurs de sécurité, et de décrire de façon claire quelles ont été les variables considérées pour laisser un pilier de telle ou telle forme.

Nous pensons que les meilleurs résultats proviennent de la combinaison de deux (2) éléments, i.e., que l'expérience et la connaissance acquise durant le minage d'un gisement doivent servir à orienter les études de stabilité d'aspect plus théorique ou mathématique.

L'annexe 3 résume chacun de ces aspects de conception en insistant sur la description des méthodes utilisées, les " trucs" développés dans telle ou telle situation, et les étapes franchies pour obtenir les résultats désirés.

V- DISCUSSIONS SUR LES PILIERS DE SURFACE

Selon la définition du pilier de surface, formulée au début de cette étude, toutes les mines souterraines possèdent un tel pilier. La seule exception serait les opérations de foudroyage en blocs ou " block caving" . En effet, nous ne connaissons pas d'exemple de mine qui opère sans plafond. Evidemment, il faut faire la part des choses et retenir que toutes n'ont pas à se préoccuper de la conception et de l'optimisation de leurs piliers de surface et ceci pour de multiples raisons souvent évidentes.

La question fondamentale est donc de reconnaître à quel moment il faudra sérieusement s'intéresser au dimensionnement du pilier de surface.

L'une des façons de répondre à cette question est de classifier les piliers de surface afin d'obtenir une variété de modèles parmi lesquels les opérateurs pourraient reconnaître leur condition d'opération. Les autres moyens qui peuvent apporter une réponse à cette question sont: une étude détaillée des conditions locales, et les réglementations qui, si elles existaient, forceraient les mines à agir dans ce cas.

5.1 CLASSIFICATION

L'objectif d'une classification est de fournir un outil d'évaluation simple, mais fiable, afin de permettre aux opérateurs de se situer par rapport à d'autres situations connues. Il est malheureux que, pour les piliers de surface une telle classification n'existe pas, alors qu'il existe des classifications pour les massifs rocheux et les piliers en général.

En pratique, l'industrie minière n'a pas à élaborer de classification pour opérer de façon sécuritaire, elle se pose seulement la question suivante: notre ou nos piliers de surface sont-ils stables ou non? C'est pourquoi les termes utilisés pour les décrire se résument à: piliers stables, partiellement stables, instables... L'industrie n'a donc pas développé de classification pour pouvoir fournir une meilleure réponse et se situer par rapport aux autres.

Sur ce point, nos mines canadiennes ne sont ni en retard, ni en avance sur les autres mines souterraines de métaux, situées ailleurs dans le monde.

La procédure de classification des piliers de mine verticaux se base généralement sur deux (2) approches:

. la détermination de la forme et des dimensions des piliers
. l'évaluation de plusieurs caractéristiques d'un massif rocheux, à l'aide d'une méthode systématique nommé classification géomécanique.

Nous avons vu au chapitre III, comment les piliers verticaux peuvent être catalogués par l'une ou l'autre de ces méthodes. A notre avis, dans le cas des piliers de surface, nous n'avons pas assez d'exemples pour tenter d'utiliser une classification géométrique qui puisse éventuellement conduire à la conception de ces piliers; trop de paramètres varient d'une mine, d'une zone à une autre. Ainsi le tableau 4,2 qui a été constitué à la suite des visites de mines, ne peut nous permettre de tirer que de très vagues conclusions puisqu'il n'y a aucun moyen de relier entre elles les caractéristiques de chaque massif. Toutefois, dégageons les points suivants:

. le rapport de l'épaisseur sur la largeur des trente (30) piliers répertoriés se situe entre 0,8 et 12.

. les six (6) piliers qui se sont effondrés à la mine no. 5 avaient un rapport de 0,8 à 2,0. En moyenne, il se situait autour de 1.

. donc, 84 % des piliers décrits et jugés stables avaient un rapport entre 1 et 5.

C'est vraiment tout ce qu'il est possible de conclure à partir de ces seules relations géométriques. Il en serait de même pour toute approche qui se limiterait seulement à des variables de dimensionnement.

Une solution plus complète et scientifique serait d'élaborer une classification des piliers de surface basée sur l'évaluation d'un ensemble de paramètres typiquement reliés à ces piliers et directement responsables de la stabilité de ces derniers. Par exemple, le massif comme tel, pourrait être évalué à l'aide d'une classification géomécanique, la présence d'eau en surface agirait de façon négative sur l'évaluation finale, l'addition de support artificiel positivement, etc.

Une telle classification est représentée à la figure 5.1. Il faut réaliser que la pondération ou le % de points alloués à chaque paramètre sera à définir. Elle n'a rien d'original, en ce sens que l'approche découle du cheminement utilisé par les auteurs des classifications géomécaniques dont nous avons déjà parlé. C'est cependant la première proposition qui tente d'établir un lien objectif entre les piliers de surface et qui éventuellement pourrait servir à leur conception.

PARAMETRES EVALUÉS	POINTS ALLOUÉS
1) Qualité du massif (classification géomécanique...)	---
2) Relations géométriques (épaisseur, largeur, longueur)	---
3) Méthode et séquence de minage (géométrie des excavations...)	---
4) Modes de soutènement (remblayage, boulons)	---
5) Nature et épaisseur des sols à l'aplomb de la mine	---
6) Topographie du socle rocheux	---
7) Présence de nappes d'eau (conditions hydrogéologiques...)	---
8) Travaux d'aménagement en surface...	---
9) Infrastructures souterraines voisines " actives ou abandonnées"	---
exemple de pointage	1 000 (max.)

Ces 1 000 points pourraient par exemple, être subdivisées en dix (10) classes de 100 points où les pointages ascendants indiqueraient une hausse de la stabilité du pilier de surface:

0--100--200--300--400--500--600--700--800--900--1 000 (points)

↑ Pilier de surface sur le point de s'effondrer

↑ Massif rocheux sain et sans ouverture (avant le minage)

FIG. 5.1 EVALUATION RELATIVE D'UN PILIER DE SURFACE

5.2 CONCEPTION

D'une part, la littérature consultée nous offre un choix intéressant d'approches idéales de la conception, dégage les éléments qu'il faut vérifier ou comparer pour obtenir des résultats cohérents. On nous propose, nous l'avons vu au chapitre III, de procéder par étapes; les auteurs fournissent alors soit des équations, des abaques ou des modèles de comportement qui permettront de concevoir des chantiers stables. Il y a cependant un travail d'adaptation à faire pour appliquer la majeure partie de ces approches aux piliers de surface puisqu'elles ont été développées pour les piliers verticaux des mines de charbon ou de métaux ou encore pour les travaux de génie civil.

Sauf pour la mine no 4, les visites ne nous ont pas permis de constater qu'il existe une " manière de faire" bien structurée menant à la conception d'un pilier de surface. Nous avons toutefois décelé une volonté d'assurer la stabilité et la sécurité sous terre, ainsi que le désir de tenir compte de notions économiques dans la conception du pilier de surface.

L'approche suivie par les mines dans le passé se résume ainsi: à l'aide d'une appréciation générale de la nature du roc constituant le pilier de surface, les opérateurs décidaient d'une épaisseur conservatrice. Cette appréciation provenait habituellement de l'évaluation des forages au diamant ou de la comparaison de la situation avec des massifs similaires. De là, le minage se poursuivait vers le haut du gisement. Le comportement du toit était alors évalué au fur et à mesure du minage. Les opérateurs " gardaient le contrôle" sur la stabilité du terrain. La décision d'arrêter le minage était finalement basée sur le jugement du personnel responsable ou encore sur l'apparition de signes d'instabilité.

Aujourd'hui ces mêmes opérations minières, les mines no 2 et no 3 notamment, procèdent à des vérifications de la stabilité de leurs vieux piliers. Malgré le peu d'outils mathématiques utilisés pour la conception de ces piliers, l'expérience de ces opérateurs et la méthode progressive employée pour miner le haut des gisements sont des atouts qu'il ne faut pas négliger. L'industrie minière pourrait en retirer un grand avantage si cette connaissance était traduite sur papier et confrontée sur diverses tribunes, processus que la présente étude tente d'amorcer.

Présentement, les opérateurs procèdent encore de cette façon avec cette distinction qu'ils évaluent plus en détails les conditions existant dans la mine. La mine no 4, décrite à l'annexe 3, a fait un travail exceptionnel à ce niveau. Essentiellement, le personnel de la mine a tenté d'évaluer la situation par des techniques mathématiques, puis a adopté une méthode de minage par chantier remblayé afin de conserver le contrôle du terrain. Dans ce cas, l'on a même simulé l'effondrement du toit afin d'évaluer le comportement du mort-terrain en cas de rupture du pilier de surface.

Nous pensons qu'il s'agit là d'une approche très sécuritaire à la conception d'un pilier de surface. Evidemment, il faut réaliser que la connaissance détaillée des paramètres ou facteurs susceptibles d'influencer la conception demande temps et argent. Si nous n'acceptons pas ces prémisses, il est inutile de penser optimiser la conception d'un pilier de surface.

Nous avons constaté qu'il y a une interaction directe entre la conception d'un pilier de surface et la méthode de minage utilisée pour physiquement réaliser ce pilier. Goodman (1980) illustre cet aspect en considérant la surface effective d'un pilier vertical comme étant

la surface réelle du pilier moins la zone fracturée et altérée située tout autour, résultat de la méthode de minage et du temps.

C'est pourquoi il est souhaitable que la conception d'un pilier de surface soit réalisé conjointement par au moins deux (2) spécialistes: l'ingénieur minier et le géomécanicien.

5.3 INSTRUMENTATION, CONTRÔLE, SOUTÈNEMENT

L'établissement de programmes de surveillance à l'aide d'appareils mécaniques ou d'inspections systématiques des chantiers doit avoir pour buts principaux de détecter toute lacune de conception, de vérifier un comportement déjà prévu ou encore de déceler l'effet de modifications au " design" initial. La gamme d'instruments de mesure disponible est abondamment décrite et leur application illustrée par de nombreux exemples pratiques. Rappelons que les instruments utiles à la conception des piliers de surface peuvent être regroupés en quatre (4) catégories:

- appareils de mesure des déplacements: extensomètres, lecteurs optiques...
- appareils de mesure des contraintes: vérins plats, cellules triaxiales...
- appareils de détection, des secousses sismiques et de mesure des microséismes.
- appareils de mesure des pressions d'eau: piézomètres

Nos mines ont utilisé de façon ponctuelle la plupart de ces appareils, cependant, les opérateurs comptent beaucoup plus sur un système d'inspections visuelles des chantiers, ce qui nous semble un procédé nécessaire qu'il faut maintenir. Toutefois, après avoir recueilli les données touchant la conception d'un pilier, il nous apparaît essentiel de maintenir en opération au moins un réseau d'extensomètres. Ces instruments permettraient alors de déceler dès le début tout signe de déformations susceptibles de mener ce pilier vers la rupture. Leur positionnement doit cependant être choisi avec soin selon la structure locale.

Du point de vue soutènement du pilier de surface, nous avons constaté que les mines visitées utilisent de plus en plus fréquemment des tiges d'acier cimentées par du coulis ou de la résine. Cette pratique est conforme à la théorie de plus en plus admise de l'utilisation d'un support actif, agissant de manière à préserver le plus possible la résistance initiale du massif. Il faut cependant installer ces tiges le plus tôt possible après l'excavation d'une ouverture, ce qui n'était pas toujours le cas.

5.4 RÈGLEMENTATION

Nous constations que depuis la tragédie de Belmoral, plusieurs organismes se sont prononcés sur l'importance de CLARIFIER CET ASPECT DE L'EXPLOITATION MINIÈRE SOUTERRAINE QU'EST LE DIMENSIONNEMENT DU PILIER DE SURFACE. Le service de l'Inspection des Mines (Québec) en s'appuyant sur les règlements concernant " La Salubrité et la Sécurité du Travail dans les Mines et Carrières" adoptés en vertu de la Loi sur les Mines, a tout de suite réagit face à la situation. Le Service a donc utilisé les pouvoirs dévolus aux inspecteurs pour, dans une première étape, exiger de la part des exploitants concernés par ce problème qu'ils se conforment à une série de mesures énoncées dans un mémo qui leur fut adressé. Dans un deuxième temps, le mémo mentionnait qu'une demande de modifications serait acheminée vers la Commission de la Santé et de la Sécurité du Travail, CSST (qui depuis janvier 1981 a juridiction sur les règlements miniers) afin de faire sanctionner ces mesures.

La Commission d'Enquête sur la tragédie de la mine Belmoral a pour sa part étudié la question et formulé, entre autres, trois (3) recommandations se rattachant au sujet traité dans ce travail. La première recommandation concerne la stabilité des ouvrages miniers en général. La Commission semble hésitante devant " la normalisation et la codification pour un usage donné" (p. 284, Commission..., volume 3, 1982) à cause de la trop grande diversité des types et qualités de roche. Elle dit plutôt que: " L'imposition d'une démarche incluant tous les éléments d'une saine gestion et d'une opération selon les règles de l'art permet d'assurer la sécurité, de ne pas être lié à une technologie statique et de se ménager la souplesse nécessaire pour s'adapter aux conditions diverses" (p. 285, Commission..., volume 3, 1982). Contrairement aux textes des règlements actuels, une telle démarche serait donc beaucoup plus efficace.

La seconde recommandation traite de l'exploration de surface au-dessus d'éventuels gisements. La Commission identifie alors cinq (5) types de recouvrement de surface et propose un minimum de travaux d'exploration afin d'en déterminer le plus exactement possible les caractéristiques.

La troisième recommandation se rattache plus spécifiquement aux piliers de surface. Il est question de la stabilité à court et à long terme et de l'attention qui devrait être apportée à la conception de ces piliers.

Récemment, un comité a été formé par la CSST, afin de réviser les règlements sur la salubrité et la sécurité du travail dans les mines et carrières. Il est cependant trop tôt pour connaître la nature de ces révisions et savoir si les recommandations du Service d'inspection et de la Commission d'Enquête, énoncées ci-dessus, seront ou non intégrées au nouveau texte.

La situation du point de vue réglementation est donc telle qu'évaluée en 1982 par la Commission d'Enquête..., volume 3. Les inspecteurs de la CSST continuent à utiliser la réglementation actuelle concernant les mines ainsi que les pouvoirs généraux qui leur sont dévolus en vertu de l'article 180 de la Loi sur la Santé et Sécurité au Travail (LRQ, c.S-2.1) dont nous citons ci-dessous l'article 5:

" En outre des pouvoirs généraux qui lui sont dévolus, l'inspecteur peut:

5° exiger de l'employeur, du maître-d'oeuvre ou du propriétaire, pour s'assurer de la solidité d'un bâtiment, d'une structure ou d'un ouvrage de génie civil, une attestation de solidité signée par un ingénieur ou un architecte ou une attestation prévue par l'article 54" .

A notre connaissance, il n'existe pas de règlementation précise, à ce jour, reliée directement à la conception et la surveillance des piliers de surface dans les mines de métaux. Le terme " pilier de surface" n'apparaît présentement dans aucun texte.

Après avoir fait un survol de la littérature disponible sur le sujet et constater la carence qui existe dans ce domaine, nous ne pouvons qu'encourager le développement d'une législation adaptée au problème des piliers de surface.

Cette législation serait alors beaucoup plus un guide qu'un ensemble de restrictions. Nous sommes ainsi en accord avec la philosophie d'approche proposée par la Commission d'Enquête et pensons que l'industrie minière ferait un grand pas en reconnaissant le rôle primordial des opérateurs de mines face à la sécurité générale dans les mines et à la stabilité des piliers de surface en particulier.

5.5 CONCLUSION

Conclure de façon simple cette étude est à notre avis impossible. Il est extrêmement difficile de saisir les conséquences que provoque l'ouverture de chambres dans un milieu non homogène, non isotrope et parsemé d'irrégularités qui caractérise un pilier de surface. Tant que nous ne connaissons pas la nature exacte d'un matériau, l'approche la plus logique à suivre est sans doute celle qui consiste à l'utiliser avec réserves, à analyser son comportement dans diverses situations et sous diverses conditions. C'est exactement ce que font les opérateurs de mines visitées, et ce que devraient faire les autres opérations.

Il faut toutefois nuancer cette affirmation et ajouter que dans une démarche systématique de conception du genre de celle décrite à la tableau 5.1, nos mines sont passablement avancées mais tel que mentionné au chapitre IV, le lien ne se fait pas entre la collecte des données et conception " scientifique" . D'autre part, l'on commence à s'intéresser d'avantage à la vérification de la stabilité surtout par des tournées d'inspection systématique.

L'état de la situation constaté aux mines réflète cependant celle de la revue de la littérature effectuée. Aucun processus précis n'est disponible pour aider à la conception des piliers de surface. La conception repose sur l'initiative de chaque compagnie.

TABLEAU 5.1 : ETAPES ET ELEMENTS DE CONCEPTION

OBSERVATION

- Mort-terrain
- Contact rocheux
- Position relative des ouvertures (géométrie)
- Carottes de forage
- Eau

MESURES

- Propriétés mécaniques des roches
- Contraintes
- Déplacements
- Ecoulement eau

ANALYSE

- Evaluation du massif
- Pondération de la résistance du roc en place

CONCEPTION

- Connaissance expérimentale du comportement de massif similaire
- Modèles analytiques
- Calculs théoriques simples
- Drainage
- Support

VERIFICATION

- Instrumentation
- Inspection
- Simulation

VI- RECOMMANDATIONS

Considérant,

- le peu d'études de cas et de textes scientifiques reliés à la conception des piliers de surface,
- la disponibilité de techniques d'évaluation des massifs rocheux déjà utilisées ailleurs avec succès,
- la possibilité d'adapter des solutions mathématiques à l'évaluation et la conception des piliers,
- la nécessité de fournir aux mines une méthode de traitement de l'information qui est accumulée dans leurs fichiers,
- que les méthodes de conception utilisées par les mines sont basées sur l'expérience et la méthode du " pas à pas" ,
- que trois (3) des six (6) mines visitées n'ont plus à concevoir de piliers de surface, comme c'est le cas pour la plupart des anciennes mines, mais qu'elles doivent en vérifier la stabilité,
- qu'il y a un manque évident d'uniformité dans le processus de conception,
- et le coût élevé associé à la réalisation d'études dans ce domaine,

nous proposons un ensemble de recommandations dont le but est de développer une méthodologie adaptée à la conception des piliers de surface. Nous pensons qu'il est essentiel d'obtenir de la part des mines un concensus sur les étapes de conception définies à la fin du chapitre V, afin de constituer une banque de données consistantes d'une mine à l'autre.

Ces recommandations tendent à promouvoir la recherche pour soit développer, soit optimiser certains des éléments à l'intérieur des cinq (5) étapes de conception proposées.

6.1 ÉTAPE DE L'OBSERVATION

Les mines à ce chapitre ont les outils disponibles pour obtenir les informations désirées sur le mort-terrain, la présence d'eau, etc. Elles utilisent des techniques classiques de forage, de cartographie d'arpentage et de mise en plans. Deux (2) avenues de recherche nous semblent importantes à cause des coûts impliqués dans ces travaux; c'est pourquoi nous proposons de:

- OPTIMISER LES MÉTHODES D'ÉVALUATION DU MORT-TERRAIN et du profil du socle rocheux. Déterminer le niveau de précision suffisant pour la conception des piliers et les meilleures méthodes pour y parvenir. Évaluer les coûts impliqués.

- DÉVELOPPER ET PROPOSER DES PROCÉDURES " STANDARD" POUR ÉVALUER LES CAROTTES DE SONDAGE. Nous constatons que celles-ci sont insuffisamment exploitées. Il est possible d'en récupérer beaucoup plus d'informations que ce qui est fait présentement.

6.2 ÉTAPE DES MESURES

Que ce soit pour la détermination des caractéristiques mécaniques des roches ou des contraintes naturelles existant au niveau du terrain, la technologie est disponible. La seule recommandation que nous aurions à faire dans ce domaine est de:

. CONSTITUER UNE BANQUE DE DONNÉES GÉOMÉCANIQUES au niveau d'un organisme indépendant dans laquelle seraient regroupées toutes les valeurs obtenues à partir de ces essais de terrain ou de laboratoire, avec toutes les informations complémentaires appropriées.

6.3 ÉTAPE DE L'ANALYSE

C'est la phase sinon la plus importante et la plus subjective de toute cette démarche de conception. En effet, comment regrouper en un tout cohérent la foule d'informations recueillies dans les étapes antérieures? C'est un réel problème que de saisir l'importance relative de paramètres, tels la composition du massif, sa structure, son degré de fracturation et d'altération... Dans ce domaine, il n'existe pas de solutions faciles. Quelques mines ont opté pour des méthodes de classification (NGI, CSIR, RQD) plus ou moins élaborées; d'autres semblent manquer carrément de rigueur dans ce domaine.

Il est primordial, dans cette étape, de pouvoir évaluer la capacité portante de notre massif. Idéalement, toute appréciation subjective devrait être éliminée. Nous suggérons donc:

. DE COMPARER ET ÉVALUER ENTRE ELLES LES MÉTHODES DE CLASSIFICATION GÉOMÉCANIQUE les plus connues et de voir comment elles peuvent être utilisées par notre industrie minière; bref, d'adapter une méthode aux conditions des mines canadiennes.

6.4 ÉTAPE DE LA CONCEPTION

Comme nous l'avons déjà souligné, la plupart des mines visitées basent la conception des ouvertures ou chantiers sur la connaissance pratique

du comportement du terrain, acquise par le personnel de l'opération. Celui-ci, une fois l'information de base compilée, est en mesure de comparer une situation quelconque à des conditions similaires déjà rencontrées ailleurs dans la mine. Cette approche dite par expérience est certainement valide mais ne permet pas de répondre de façon objective à toute question portant sur la stabilité du pilier de surface.

Timidement, l'utilisation de modèles analytiques tend à se répandre dans les mines mais ne peut fournir d'explications aussi satisfaisantes que nous le souhaiterions. Nous pensons donc qu'à ce niveau, plusieurs lacunes doivent être corrigées.

. IL Y A PLACE POUR DE MEILLEURS MODÈLES ANALYTIQUES. Il serait bon de définir les éléments de base minima requis pour obtenir des résultats valables. Une équipe de spécialistes dans le domaine pourrait fournir une appréciation des modèles disponibles sur le marché et même élaborer un modèle dynamique, susceptible d'être utilisé au besoin par le personnel.

. TOUT L'ASPECT DRAINAGE MÉRITE D'ÊTRE CONSIDÉRÉ AVEC PLUS DE SOIN Il pourra être utile de mieux connaître le comportement de l'eau au contact sol-roc et dans le massif afin de réduire l'effet de cette eau sur la stabilité des ouvrages.

. IL EST CERTAIN QU'UN EFFORT DOIT ÊTRE FAIT AU NIVEAU DE LA RECHERCHE DANS LE DOMAINE DE SUPPORT DU TERRAIN. Quel est le meilleur type de support adapté aux conditions des terrains? Comment l'utilisation d'un support adéquat peut-il augmenter et par combien, la stabilité du pilier de surface?

6.5 ETAPE DE LA VÉRIFICATION

La vérification du comportement du massif est un élément important de nos opérations minières. Le " monitoring" est surtout utilisé afin de déceler tout signe d'instabilité. Dans la plupart des opérations, c'est un processus qui est peu développé et peu systématisé. C'est-à-dire que la direction compte beaucoup sur " les yeux et les oreilles" des employés pour s'assurer de la stabilité et ce, d'une façon informelle. Comme outil de vérification, l'instrumentation n'est que très peu utilisée. La vérification des ouvrages est alors perçue beaucoup plus comme une mesure de prévention que comme un procédé de contrôle d'un comportement prévu. Dans ce domaine, les instruments sont disponibles; il suffit de convaincre les opérateurs de leur utilité dans telle ou telle situation.

Dans ce secteur, nous pensons que la meilleure contribution serait de:

. UTILISER UNE MINE COMME LABORATOIRE DE RECHERCHE. Instrumenter son pilier de surface et suivre son évolution dans le temps. Cette propriété pourrait alors servir de modèle face aux autres mines.

VII- MODALITÉS D'APPLICATION DES RECOMMANDATIONS

À la suite des recommandations énoncées au chapitre VI, nous proposons de confier à divers organismes le rôle de mener à termes les recherches dans ces domaines ou de coopérer à leur bon déroulement selon leurs possibilités respectives.

À notre avis, le résultat pratique de cette démarche devrait être la publication d'un GUIDE DE CONCEPTION dans lequel seraient expliquées les étapes requises afin de concevoir rationnellement et le plus scientifiquement possible les piliers de surface, dont un ou plusieurs chapitres seraient consacrés plus spécialement à la vérification de la stabilité des piliers déjà en place ainsi qu'à la méthode de minage optimale requise pour miner immédiatement sous ces piliers.

Un tel guide positionnerait l'industrie minière canadienne des mines de métaux en tête de liste, devant à la fois la législation et l'industrie en général. Ce guide pourrait également n'être qu'une partie d'un GUIDE PLUS GÉNÉRAL adapté à la stabilité, au sens large du terme, de nos mines souterraines.

Résumons brièvement cette fois par ordre de priorité, les huit (8) recommandations énumérées au chapitre VI.

1. OPTIMISER LES MÉTHODES D'ÉVALUATION DU MORT-TERRAIN.

2. DÉVELOPPER ET PROPOSER DES PROCÉDURES " STANDARD" POUR ÉVALUER LES CAROTTES DE SONDAGE (non pas seulement la teneur en minerai mais aussi et surtout les caractéristiques du roc).

3. COMPARER ET ÉVALUER ENTRE ELLES LES MÉTHODES DE CLASSIFICATION GÉOMÉCANIQUE.

4. CONSTITUER UNE BANQUE DE DONNÉES GÉOMÉCANIQUES sur nos piliers de surface actuels.

5. DÉFINIR, DÉVELOPPER ET ADAPTER DES MÉTHODES DE SUPPORT applicables aux piliers de surface.

6. INSISTER SUR UNE TECHNIQUE DE DRAINAGE adaptée à la partie supérieure des gisements.

7. DÉVELOPPER DE MEILLEURS MODÈLES ANALYTIQUES.

8. UTILISER UNE MINE DONT LE PILIER DE SURFACE est représentatif, COMME LABORATOIRE DE RECHERCHE où serait vérifiée la méthode de conception.

Afin de mieux visualiser le cheminement proposé, nous avons regroupé au tableau 7.1, les variables impliquées.

Le coût de ces recherches serait à notre avis facilement compensé par les avantages que l'industrie minière pourrait en retirer. En effet, même si les compagnies minières importantes ont le personnel et les moyens financiers pour réaliser ou faire réaliser une foule d'études reliées à leur(s) pilier(s) de surface, elles ne peuvent se permettre des dépenses superflues. De plus, sans vouloir quantifier ce sujet, il serait bon de s'interroger sur le coût reel en termes de capital humain, financier et de publicité négative sur l'ensemble de l'industrie minière, résultant d'un effondrement majeur d'un pilier de surface.

Le GUIDE proposé serait donc un outil de travail adapté au besoin d'efficacité recherché par l'industrie; il permettrait au gens de s'appuyer sur une démarche, idéalement optimisée, qui pourra leur éviter de perdre du temps inutilement tout en leur fournissant des résultats fiables à un coût minimum.

De plus, la prévention d'un seul effondrement majeur d'un pilier de surface en considérant son impact humain, financier ainsi que la publicité négative qui en résulte, justifierait amplement le programme proposé.

Finalement, une telle initiative démontrerait une fois de plus que l'industrie minière veut continuer à se doter d'outils d'exploitation et de prévention qui puissent augmenter la sécurité dans nos mines souterraines.

TABLEAU 7.1

ELABORATION D'UNE STRATÉGIE DE CONCEPTION
DES PILIERS DE SURFACE

ÉTAPE / INTERVENANTS	1 DIFFUSION DU RAPPORT ACCEPTATION DES RECOMMANDATIONS	2 RECHERCHES	3 GUIDE PRATIQUE	4 VERIFICATION DE LA MÉTHODE
Compagnies minières	. Constituer des dossiers uniformes sur les piliers de surface.	. Fournir un laboratoire de terrain. . Implication dans un domaine de recherche quelconque	. Implication dans la recherche selon leurs possibilités et intérêts.	. Évaluation des piliers en place à l'aide du guide.
Association représentative	. Obtenir un consensus sur les cinq (5) étapes de conception énoncées.	-----	-----	. Collecte et appréciation des résultats obtenus.
Organismes publics	. Soutien financier pour initier le processus	. Initiation de la recherche sur les sujets (1), (2), (3), (4), (5)	. Élaboration d'un manuel de conception des piliers de surface . Recherche sur les points (6), (7).	. Vérification de la méthode et mise en marche de la recherche appliquée décrite à la recommandation (8).
Groupe-Conseil privés	. Agents de relation entre les intervenants pour promouvoir ce projet.	. Participation à la recherche dans différentes sphères d'activités.	. Participation à la rédaction du guide . Rôle actif dans la recherche	. Participation conjointe à l'évaluation des piliers de surface.

ANNEXE 1

TERMINOLOGIE DES PILIERS

TABLE DES MATIERES

PAGE

1.0 TERMINOLOGIE DES PILIERS 57

1.1 PILIERS DES MINES DE METAUX 58
1.2 PILIERS DES MINES DE CHARBON 62
1.3 PILIERS SPECIAUX 65
1.4 PILIERS DES MINES VISITEES 67

1. TERMINOLOGIE DES PILIERS

Au cours de la recherche bibliographique, plusieurs termes désignant les piliers revenaient souvent d'un article à l'autre et une énumération de ceux-ci, avec leur définition et une illustration graphique les représentant, aidera à dissiper la confusion qui règne autour de ces termes. En premier lieu, il est important de noter que la revue de la littérature a fait ressortir trois différents groupes de termes reliés aux piliers de mine. Les prochaines sections passent en revue ces groupes de termes.

1.1 PILIERS DES MINES DE METAUX

Ce premier groupe établit la liste des termes couramment rencontrés dans les MINES DE METAUX DE BASE. De plus, la figure 1.1 illustre l'aspect et la position des piliers énumérés ci-dessous:

CROWN PILLAR — PILIER DE TOIT
ROOF PILLAR — PILIER DE COURONNE
LEVEL PILLAR — PILIER DE VOUTE
STRIKE PILLAR — STOT
HORIZONTAL PILLAR

Il s'agit d'un pilier généralement constitué de minerai, laissé temporairement en place dans le haut des chantiers, pour protéger ces derniers, une galerie, un niveau d'exploitation ou un accès. Le pilier est normalement enlevé, lorsque son rôle est terminé. Le mot contient la notion de "stabilité". Par extension, il est souvent utilisé pour définir le pilier de protection laissé en surface du gisement.

RIB PILLAR — PILIER DE PAROI
DIP PILLAR — PILIER DE SEPARATION
TRANSVERSE PILLAR

Se définit d'un pilier dont la longueur est dans la même direction que le pendage du gisement. Ce type de pilier est utilisé dans le cas de gisement incliné à plus de 25°. Il réunit le toit et le plancher de la minéralisation et est habituellement monolithique, continu de part en part de la zone exploitée. Le "rib pillar" sépare les chantiers les uns des autres et pourra éventuellement être récupéré.

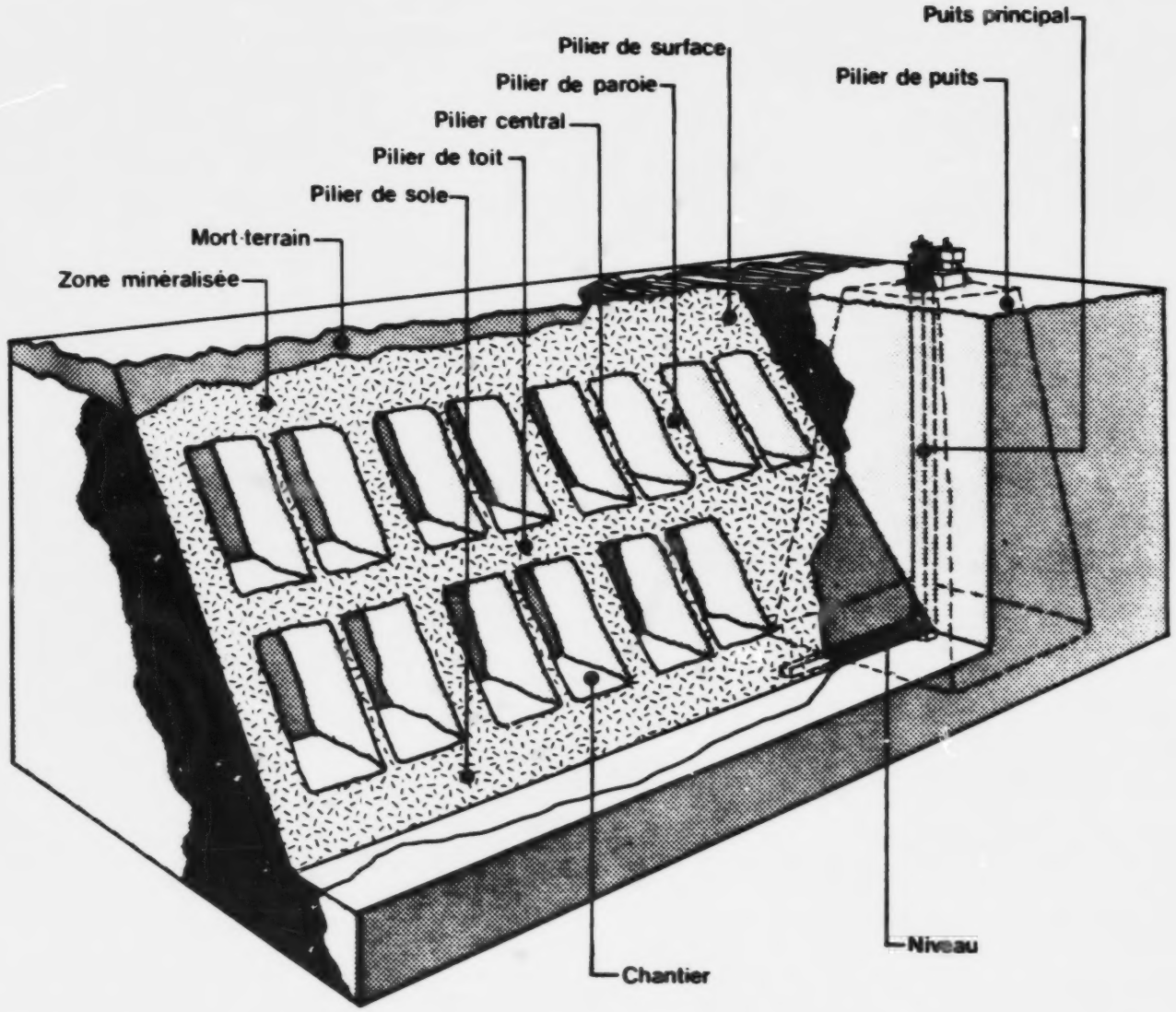


FIG. 1.1 PILIERS-MINES DE METAUX

SILL PILLAR — PILIER DE SOLE

A l'opposé du "crown pillar", il s'agit d'un pilier généralement constitué de minerai, laissé temporairement en place dans le bas des chantiers, à chaque sous niveau. Son utilité est de protéger les galeries, les points de soutirage, les accès, etc. Ce type de pilier est laissé à l'horizontale.

CENTER PILLAR — PILIER CENTRAL

Pilier laissé au centre d'un chantier, utilisé avec les "rib pillar", afin de réduire la portée du toit. Ce genre de pilier est souvent découpé par des galeries de transport ou des accès.

PILLAR — PILIER

STUB PILLAR — PILIER DE SOUCHE

Support découpé dans le minerai ou la pierre stérile, afin de supporter le toit. Les piliers varient en largeur, longueur et hauteur, en forme et composition; ils peuvent être temporaires ou permanents. Utilisé seul, le mot fait surtout référence au pilier de la méthode d'exploitation dite par "chambres et piliers" utilisé pour le minage des gisements à faible pendage ou horizontaux.

SHAFT PILLAR PILIER DE PUITS

Ce type de pilier sert de protection autour d'un puits de mine. Le puits peut être vertical ou incliné, de même que le pilier qui l'entoure. La forme de ce dernier est variable, il peut être plus large en profondeur. C'est un pilier permanent pour toute la durée de l'opération de la mine.

1.2 PILIERS DE MINES DE CHARBON

Un deuxième groupe de termes illustrés par la figure 1.2 semblent réservé exclusivement aux mines de charbon. Ils sont abondamment cités dans la littérature anglaise. Il est à noter que les nombreux rapports traitant de la stabilité dans les mines de charbon ont contribué au développement des mines de métaux, de sel... Les opérateurs de mines de charbon ouvraient en quelque sorte la voie aux dirigeants des autres types de mines. Les termes utilisés pour désigner les divers piliers sont:

BARRIER PILLAR — PILIER DE SEPARATION

Ils servent à séparer les chantiers ou "panneaux", à assurer la stabilité du toit et sont essentiels afin de contrôler la ventilation sous terre. Généralement, ils sont permanents pour toute la durée de la mine.

ENTRY PILLAR — PILIER D'ENTREE

Situés le long des voies de développement des chambres et piliers (longue taille), utilisés pour le minage des veines de charbon, ces piliers ont un rôle de protection des voies d'accès aux chantiers. Ils sont semi-permanents, i.e. qu'ils sont utiles pour la durée de vie des secteurs qu'ils desservent.

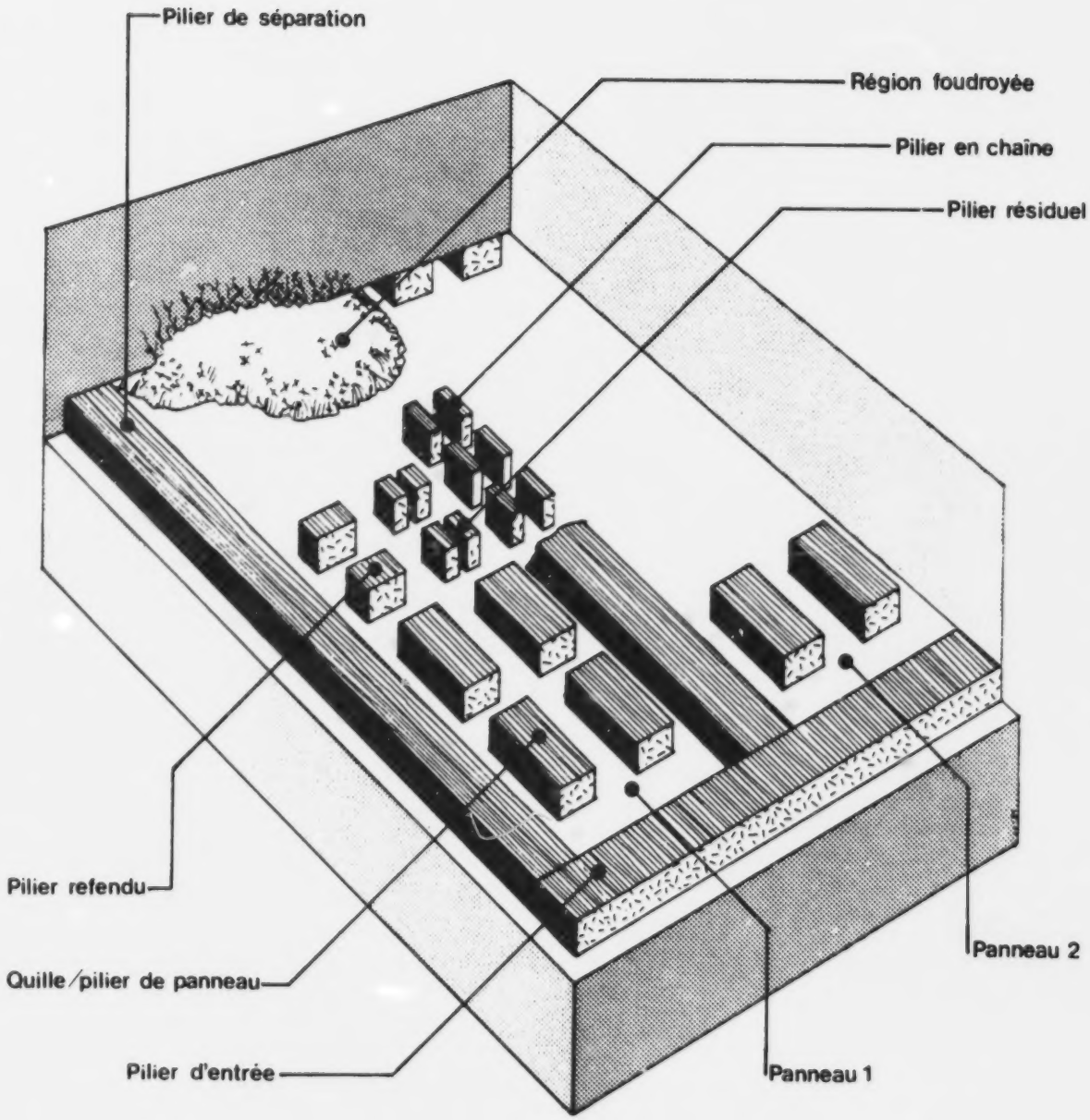


FIG. 1.2 PILIERS-MINES DE CHARBON

PANEL PILLAR — PILIER DE PANNEAU
QUILLE

Ces piliers, généralement distribués uniformément à l'intérieur d'un "panneau" ou de la taille, assurent le soutien du toit à l'intérieur de la chambre; ils sont temporaires.

SPLIT PILLAR — PILIER REFENDU

Se dit d'un "panel pillar" qui a été coupé en deux (2) sections au moment du minage des piliers, en fin d'exploitation d'une chambre.

REMNANT PILLAR — PILIER RESIDUEL

Définit la portion restante d'un "split pillar". Ce type de pilier est voué à l'extraction complète. Il est possible qu'il s'effondre ou soit abattu. Il ne supporte en pratique plus rien.

CHAIN PILLAR — PILIER EN CHAINE

Définit une série de petits piliers alignés selon l'axe de séparation entre les panneaux. Ils jouent le même rôle que les piliers de séparation mais permettent un taux d'extraction plus élevé, ainsi que le fluage du toit dans certains cas.

1.3 PILIERS SPECIAUX

La troisième catégorie de termes s'applique aux piliers qui ont une vocation spéciale. Ces piliers illustrés à la figure 1.3 sont définis selon la fonction qu'ils remplissent. Par exemple, on retrouve dans la littérature les termes suivants:

POST PILLAR ou YIELDING PILLAR
Le terme découle d'une méthode de minage développée à la mine Strathcona. Il définit un pilier spécialement dessiné et conçu pour se fracturer et céder, lorsque le rapport de sa longueur/largeur atteint un nombre prédéterminé.

PERMANENT PILLAR ou TEMPORARY PILLAR
Durant toute la vie de la mine,' les piliers permanents assureront la stabilité de la mine sans qu'il y ait extraction de ceux-ci. Les piliers temporaires sont voués à l'extraction durant l'exploitation minière.

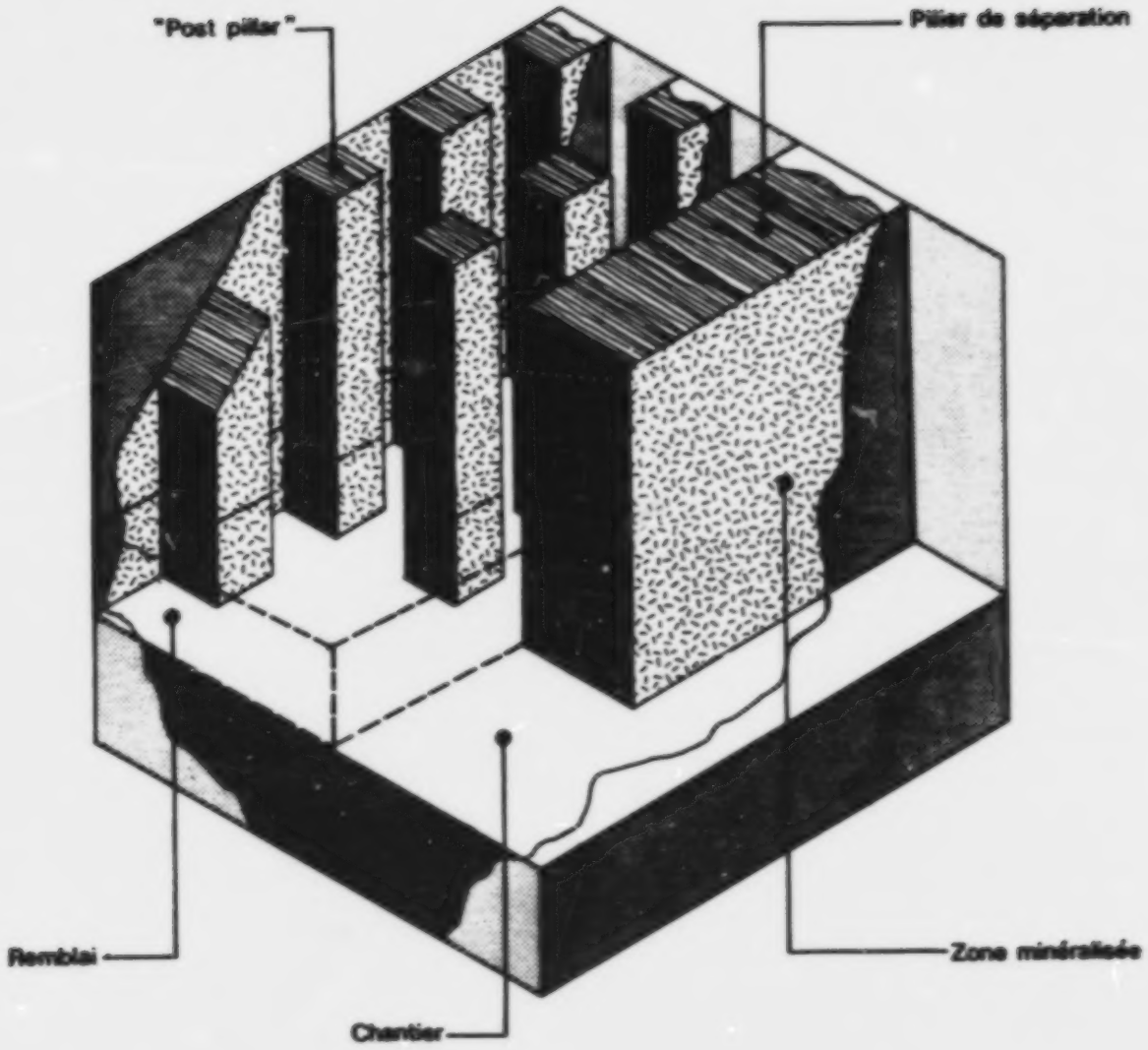


FIG. 1.3 PILIERS SPECIAUX

1.4 PILIERS DES MINES VISITEES

La liste des termes rencontrés au cours de la visite des mines est résumé dans le tableau 1.1. Parmi ces termes, plusieurs ont déjà été explicités dans les pages précédentes, et les nouveaux termes comme "major apex" ou "longitudinal pillar" sont illustrés et définis dans les compte-rendus détaillés des visites de mines présentés à l'annexe 3.

TABLEAU 1.1 : TERMINOLOGIE DES PILIERS DE MINE

MINE NO 1	MINE NO 2	MINE NO 3	MINE NO 4	MINE NO. 5	MINE NO 6
- Pilier de couronne ("crown piller")	- Pilier supérieur ("crown piller")	- Pilier permanent ("permanent piller")	- Pilier ("piller")	- "Rib piller", end piller", "transverse piller", "vertical piller"	- Pilier transversal
- Pilier principal ("major apex")	- Pilier inférieur ("sill pillar")	- Pilier ("piller")	- Pilier de couronne ("crown piller")	- "Sill pillar"	- Pilier longitudinal
- Pilier secondaire ("minor apex")	- Pilier de surface ("surface pillar")	- Pilier de surface ("surface pillar")	- Stot	- "Longitudinal piller"	- Pilier de surface
		- Pilier de couronne		- "Center piller"	
		- Stot		- "Surface piller"	

ANNEXE 2

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE - METHODOLOGIE

TABLE DES MATIERES

PAGE

2. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE - METHODOLOGIE 71

2.1 CUEILLETTE ET CHOIX DES DOCUMENTS 71
2.2 INVENTAIRE DE LA DOCUMENTATION 79
2.3 METHODES DE CONCEPTION 86
2.4 LISTE BIBLIOGRAPHIQUE 106

2. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE - METHODOLOGIE

2.1 CUEILLETTE ET CHOIX DES DOCUMENTS

Cette annexe passe en revue la méthodologie adoptée pour obtenir les documents et donne un inventaire de la littérature en insistant principalement sur les approches à la conception des piliers.

Etant donné les objectifs énoncés au chapitre 1, nous avons tenté d'exploiter toutes les formes possibles de documentation. En premier lieu, nous avons retracés quelques articles déjà connus et traitant du sujet afin de nous familiariser davantage avec la terminologie usuelle. Par la suite, nous avons sélectionné les mots-clés essentiels dans le cadre d'une recherche informatisée.

Une fois les types de documents disponibles connus, nous avons finalement discuté avec le comité consultatif. Ce dernier avait pour tâche de nous indiquer, le cas échéant, d'autres sources de documentation. Finalement, les revues scientifiques récentes (1982, 1983, 1984) ont été parcourues afin de dégager des titres qui n'auraient pu être inventoriés dans les banques informatisées, souvent déphasées par rapport aux données disponibles.

. Types de documents

Suite à la méthodologie utilisée, nous avons obtenu divers types de documents. Le tableau 2.1 résume l'ensemble des sources d'information écrites utilisées au cours de la revue de la littérature.

Ainsi, à partir des banques de données, nous avons retracé plusieurs types de documents tels que: conférences et symposiums, périodiques et rapports publics.

. Choix des mots-clés

La recherche bibliographique assistée par l'ordinateur n'est efficace que dans la mesure où les mots-clés que l'on utilise sont de bons descripteurs du domaine à répertorier. Dans cette optique, divers mots-clés auraient pu être utilisés.

Ceux qui nous ont semblé les plus efficaces sont indiqués au tableau 2.2 avec un exemple d'utilisation. Une fois les mots-clés choisis, il faut procéder à un recoupement judicieux des termes utilisés afin d'éviter un nombre inutile de titres (e.g. "mining" avec 49041 titres). Après avoir manipulé et évalué le nombre de titres obtenus, nous nous sommes arrêtés à l'étape No 11 du tableau 2.2. Nous avons ainsi obtenus 287 références provenant uniquement de la banque "GEOREF" utilisée ici comme exemple.

TABLEAU 2.1: SOURCES D'INFORMATION

BANQUES DE DONNEES INFORMATISEES

- Fichiers: GEOREF, MINTEC, NTIS, COMPENDEX

CONFERENCES ET SYMPOSIUMS

- Australian and New Zealand Conference on Geomechanic
- Conference Internationale sur la Stabilité dans les Mines Souterraines
- Congrès International de Mécanique des Roches
- Symposium Canadien de Mécanique des Roches
- U.S. Symposium on Rock Mechanics

PERIODIQUES

- American Underground Space Association
- Bulletin de Liaison de Laboratoires des Ponts et Chaussées (France)
- C.I.M. Bulletin
- Engineering and Mining Journal (London)
- Geotechnics (Angleterre)
- Industrie Minérale - Les techniques (France)
- Institution of Mining and Metallurgy (London)
- International Journal on Rock Mechanics
- Journal Canadien des Sciences de la Terre
- Journal of American Society of Civil Engineering
- Mining Engineering (A.I.M.E.)
- Ouvrages de la Society of Mining Engineering (A.I.M.E.)
- Revue Canadienne de Géotechnique

RAPPORTS PUBLICS ET INTERNES

- Rapports de CANMET
- Rapports présentés par des Commissions
- U.S. Bureau of Mines

TABLEAU 2.2: RESULTATS DE RECHERCHE OBTENUS DE LA BANQUE GEOREF

MOTS-CLES	NOMBRE D'ARTICLES
1. Pillar	161
2. Pillars	275
3. (1) or (2)	373
4. Mining	49041
5. Mine	7909
6. Mines	6063
7. (4) or (5) or (6)	56417
8. Underground (w) mining	144
9. Underground (w) mines	50
10. (8) or (9)	193
11. (3) and (7 or 10)	287

Cet assemblage de mots-clés a été par la suite utilisé auprès de trois (3) autres banques de données. Les banques MINTEC, COMPENDEX et NTIS nous ont fourni chacune respectivement 667, 552 et 204 références. Cependant, plusieurs références sont communes à toutes ces banques et il nous a donc fallu les trier afin de rejeter les informations répétitives.

. Compléments de documentation

Le nombre de documents pour les années 1982, 1983 et 1984 est probablement incomplet à cause du retard apporté par les banques de données bibliographiques à mettre à jour la liste des publications. Pour cette raison, nous avons revu les index récents (1982, 1983, 1984) des périodiques indiqués au tableau 2.1. De plus, les conférences sur la "Mécanique des Roches", tenues en 1982, 1983 et 1984, ont été scrutées minutieusement.

. Codification de la documentation

La liste des titres et leur résumé ont été analysés attentivement et ceux qui apparaissaient comme inutiles ou non-pertinents ont été éliminés de la liste initiale. Avec la liste finale, nous avons obtenus les documents soit directement auprès de personnes ou d'organismes ressources, ou à partir de commandes spéciales envoyées à l'extérieur du Québec.

Tous les documents obtenus ont été parcourus et codifiés selon la grille indiquée au tableau 2.3. Une fois la codification complétée, les résultats sont associés à chacun des titres retenus aux fins de ce projet et regroupés dans une banque de données spécialement réalisée pour cette recherche. La grille de codification présentée au tableau 2.3 rend beaucoup plus efficace l'identification des documents relatifs à tel ou tel sujet. Ainsi, elle décrit la région, la pertinence, la nature du problème et les données techniques (e.g. dimensionnement) propres à chacun des documents. Dans la liste bibliographique fournie à la fin de la présente annexe, on retrouvera le code alpha-numérique (cf. tableau 2.3) décrivant les aspects abordés dans chacun des documents retenus.

La liste bibliographique présente donc par ordre alphabétique tous les auteurs retenus et donne le code des articles. Nous obtenons ainsi un "outil" approprié pour entreprendre l'examen de cette vaste documentation.

Depuis le début de la recherche bibliographique, plus de 1 000 références ont ainsi été étudiées, mises en banque ou rejetées. Ces références proviennent de plus d'une vingtaine de sources d'information différentes tel que mentionné au tableau 2.1.

Parmi les références passées en revue, environ 830 ont été rejetées et les quelques 170 ouvrages retenus ont été analysées, codifiées selon la grille du tableau 2.3 et emmagasinées dans une banque informatisée. Plusieurs références jugées pertinentes ont été obtenues à l'aide de demandes d'emprunt inter-bibliothécaire.

TABLEAU 2.3 : GRILLE DE CODIFICATION

1. REGION

a) Canada
b) U.S.A.
c) Europe
d) Royaume-Uni
e) Afrique
f) Australie
g) Amérique du Sud
h) U.R.S.S.
i) Asie

2. APPRECIATIONS/GENERAL

a) Très pertinent
b) Histoire de cas
c) Théorique
d) Pratique
e) C et D

3. CONTEXTE AU-DESSUS DU PILIER

a) Sol
b) Lac ou rivière ou océan ou tourbière
c) A et B
d) Rien

4. CRITERES DE RUPTURE

a) Piliers de surface
b) Piliers en général
c) Tunnels

5. DIMENSIONNEMENT

a) Piliers de surface
b) Piliers en général

6. MONITORING

a) Déformation/contrainte (pilier)
b) Pression d'eau
c) Déformation/contrainte (général)
d) Général, global
e) Sismique et micro séismes
f) E et D

7. METHODE D'EVALUATION DE LA STABILITE

a) Empirique
b) Analytique
c) Numérique (éléments finis)
d) Probabilistique
e) Multiple
f) Collecte de données "in situ"

8. REGLEMENTATION

a) Lois
b) Règlements - Guides
c) A et B

9. TYPES DE GISEMENTS

a) Massif (plug)
b) Tabulaire -45°
c) Tabulaire +45°
d) Irrégulier

10. TYPES DE MINERAI

a) Charbon
b) Sel
c) Métaux
d) Multiple
e) Autres

11. SOUTENEMENT

a) Pilier

12. METHODE DE MINAGE

a) Chambre et piliers
b) Sous niveaux
c) Foudroyage

13. REMARQUES PARTICULIERES

a) Classification des roches
b) Critère de design bien expliqué
c) Sujet de recherche future
d) Bibliographie

14. METHODES DE RENFORCEMENT

a) Boulons d'ancrage
b) Câbles d'acier
c) Additifs chimiques

Notre banque informatisée regroupe les données suivantes:

- nom de(s) (l')auteur(s)
- année de parution de l'ouvrage
- titre de l'ouvrage
- source de l'information
- série de codes décrivant l'ouvrage

Le document principal reproduisant l'ensemble des résultats est une liste structurée selon l'ordre alphabétique des auteurs. A la fin de la présente annexe, on trouvera la liste complète des ouvrages retenus, ainsi que leurs principales caractéristiques. C'est à partir de cette liste que nous avons procéder à l'analyse systématique de la littérature. Le but de cette analyse, rappelons-le, était de dégager les éléments qui pouvaient contribuer à mieux définir les problèmes reliés à la conception des piliers de surface.

2.2 INVENTAIRE DE LA DOCUMENTATION

. Distribution temporelle des articles

La figure 2.1 illustre la distribution temporelle des ouvrages pertinents. Cette figure permet d'identifier des années actives qui correspondent généralement à la tenue de congrès internationaux, conférences nationales annuelles ou symposiums. Le quatrième congrès international de mécanique des roches tenu à Montreux (Suisse), en 1979, est en grande partie responsable du nombre élevé d'articles publiés cette même année.

Un fait intéressant à noter est l'intérêt soudain, depuis 1973, que manifestent de nombreux organismes oeuvrant dans l'industrie minière envers la mécanique des roches. Le développement de cette science relativement jeune et ses applications sans cesse croissantes ne sont pas étrangers à l'augmentation du nombre d'ouvrages traitant spécifiquement des piliers de mines.

. Distribution régionale des articles

Dans le but d'illustrer la provenance de nos textes, la figure 2.2 indique le nombre de publications retenues par pays ou continents. Les Etats-Unis et le Canada viennent en tête de liste avec les plus grands nombres d'articles traitant des piliers. Ces deux pays contribuent pour environ deux tiers du nombre total, l'Europe et la Grande Bretagne

ANNEES	NOMBRE D'ARTICLES
1965	-
1967	---
1968	---
1969	--
1970	----
1971	-----
1972	-----
1973	------------------------
1974	---------
1975	---------
1976	----------
1977	---------
1978	--------
1979	-------------------------
1980	----------------
1981	----------------
1982	----
1983	----------------

FIG. 2.1 DISTRIBUTION TEMPORELLE

PAYS/CONTINENT	NOMBRE D'ARTICLES
Etats-Unis	----------
Canada	----------
Europe et Grande-Bretagne	----------
Afrique	----------
Australie	-------
Asie	-------
Afrique du Sud	-

FIG. 2.2 DISTRIBUTION REGIONALE

représentent environ un sixième et l'Afrique, l'Australie, l'Asie et l'Amérique du sud complètent le sixième restant. Cela s'explique à cause de nombreux facteurs dont les plus importants sont les suivants:

- Rejet de la plupart des textes reliés au charbon provenant surtout d'Europe
- Organismes et chercheurs plus nombreux en Amérique du Nord qu'ailleurs
- Problème linguistique par rapport aux pays de l'Europe de l'Est et de l'Asie
- Accès facile aux sources d'information nord-américaine

. Types de gisements et de minerais

Parmi les articles étudiés plus de la moitié ne donnent pas de renseignements sur la forme, les dimensions et la nature des gisements ou ne traitent que de généralités théoriques et/ou pratiques sans faire allusion à un type de gisement en particulier. Les gisements tabulaires avec pendage inférieur à 45° sont les plus nombreux parmi ceux inventoriés. Ceci est dû en partie aux nombreuses études effectuées dans les mines situées dans des dépôts peu remaniés, d'origine sédimentaire. Les mines de métaux et de charbon sont de loin les types de gisements les plus couramment rencontrés. Rappelons cependant que notre attention s'est surtout tournée vers les mines de métaux.

. Particularités sur les articles traitant des piliers de surface

Dix-huit articles mentionnent ou discutent des dimensions de piliers de surface. Le partage de ces articles s'effectue de cette façon:

- dix articles touchant les mines de métaux: Page et Brennen, 1983; Tincelin, 1982; Commission d'enquête-Mine Belmoral, 1980; Touseull et Rich, 1980; Brissenden, 1980; Hedley et al., 1979; Sandy et al., 1977, 1976; Oko et Taylor, 1974; Southey, 1969; Tincelin et Riveline, 1965.

- cinq articles touchant le charbon: Dejean et Arcamone, 1979; Babcock et Hooker, 1977; Wardell, 1976; Skelly et Loy, 1976; Orchard, 1969 et 1975.

- un article touchant la craie: Bonvallet et al., 1978.

- un article touchant à la fois le charbon, les métaux, le calcaire, la craie, etc.: Maury, 1979.

Les études touchant les piliers de surface sont souvent effectuées d'une manière indirecte ou encore suite à des conditions particulières de terrain. Par exemple, les mines à ciel ouvert qui sont exploitées par la suite en souterrain demandent des études spéciales de contraintes dans le pilier de surface. C'est le cas des mines Shangani (Zimbabwe) (Page et Brennen, 1983) et Kidd Creek (Ontario) (Hedley et al., 1979) où les contraintes autour du pilier de surface ont été

étudiées par des méthodes numériques. Parfois, des rapports décrivant des mines sous-marines donnent des renseignements sur les piliers de surface (Southey, 1969; Orchard, 1969 et 1975).

Les études de tassement donnent aussi des renseignements sur le comportement des piliers de surface. Tincelin et Riveline (1965) définissent une zone critique où les tassements peuvent créer des problèmes aux infrastructures situées au-dessus d'une mine souterraine. Cette zone est délimitée par des angles d'influence, dits de danger, lesquels sont fonction de la profondeur et des dimensions des chantiers exploités. La nature du mort-terrain et du massif rocheux et les conditions de drainage sont également des facteurs qui influencent la superficie de la zone critique.

Les piliers de surface dans les mines de charbon ont été l'objet de nombreuses études aux Etats-Unis. Des guides et des règles ont été énoncés pour la conception de ces piliers, plus particulièrement lorsqu'il y a présence de nappes d'eau près du gisement à exploiter (Babcock et Hooker, 1977; Wardell, 1976; Skelly et Loy, 1976). Ces guides sont généralement conservateurs et donnent les dimensions minimum à respecter dans la conception du pilier de surface. Cependant, il est bon de noter que ces guides ne s'appliquent qu'au charbon et qu'aucune étude d'envergure sur les piliers de surface dans les mines de métaux n'a été jusqu'à présent entreprise.

Parfois, suite à l'effondrement d'un pilier de surface, des commissions d'enquête sont instituées dans le but d'établir les causes et les circonstances de cet événement. Par exemple, la commission d'enquête sur la tragédie survenue à la mine Belmoral a produit un compte-rendu technique détaillant le pilier de surface. Les chercheurs français Maury (1979) et Dejean et Arcamone (1979) ont analysé quelques effondrements ou affaissements survenus dans des mines de la France et donnent les dimensions de quelques piliers de surface (stots de protection).

2.3 METHODES DE CONCEPTION

La conception d'un pilier est établie principalement à partir des données de terrain, telles la géologie du site et aussi selon le type d'exploitation projetée. Ces données aident à définir la géométrie du problème. Une fois cette étape franchie, le dimensionnement du pilier se fait à partir de deux types de données: (1) les facteurs de sécurité et (2) les critères de rupture.

- Facteurs de sécurité

Dans la pratique du génie civil, la résistance des matériaux est assez bien connue et elle peut être déterminée à l'avance avec un certain degré de confiance. Cela est dû principalement à la qualité et à l'homogénéité des matériaux utilisés dans les travaux de construction. Que ce soit la résistance en tension, en compression ou au cisaillement, il est généralement facile d'appliquer un facteur de sécurité pour le dimensionnement des poutres, des colonnes de béton... Un tel facteur de sécurité est utilisé pour prévenir des accidents qui pourraient survenir suite à une surcharge (limitée) non prévue ou encore à une faiblesse ou à un défaut dans le matériau.

Si on prend l'exemple d'une colonne de béton, sa résistance ultime moyenne en compression "Rc", qui est obtenue à partir d'essais effectués sur des échantillons, est comparée à la charge "P" qu'elle devra supporter dans une infrastructure donnée: le rapport $\frac{Rc}{P}$ indique alors combien de fois la

colonne de béton pourrait supporter cette charge sans s'effondrer. Un facteur de 1 indique un état d'équilibre précaire et que la rupture peut survenir à tout moment. Un facteur de sécurité de 1,2 (rapport $\frac{Rc}{P}$ = 1,2) est souvent utilisé pour les matériaux de construction et les dimensions des matériaux appelés à subir des contraintes sont choisies en conséquence.

La résistance Rc représente bien le comportement réel de la colonne sur le terrain et, d'une façon plus générale, on peut formuler l'équation suivante:

$$Fs = \frac{Qu}{P}$$

où Fs = facteur de sécurité
Qu = résistance ultime du matériau sur le terrain. Avec l'exemple ci-haut mentionné, on aura Qu = Rc
P = charge appliquée sur le matériau

Dans le cas d'un pilier de mine, l'approche est différente car sa résistance à l'effondrement n'est pas connue avec autant de précision que les matériaux de construction. Tout comme dans la pratique du génie civil, l'objectif visé est de s'assurer que la charge appliquée sur le matériau, en l'occurrence un pilier de mine, ne dépasse sa résistance ultime. Cette dernière est toutefois difficile à prédire en raison des nombreux facteurs tels les diaclases, la schistosité, l'hétérogénéité de la roche... qui influencent les caractéristiques mécaniques du massif rocheux constituant le pilier

de mine. De nombreux chercheurs ont tenté d'approximer la résistance du pilier avec des formules empiriques qui tiennent compte d'un ou plusieurs paramètres, tels le rapport largeur du pilier / hauteur du pilier, le volume du pilier, la perméabilité... Etant donné l'écart respectable des résultats obtenus à partir d'essais en compression effectués sur des échantillons de roche de petite taille, les chercheurs appliquent à la résistance obtenue en laboratoire un facteur dit d'inconnu qui représente l'ensemble des conditions de terrain et qui compense les éventuelles erreurs dans les hypothèses formulées dans la conception du pilier. Duvall (1977) mentionne que de nombreuses ouvertures souterraines ont été conçues avec les facteurs d'inconnu suivants:

$$\sigma_t \leq T_o / F_t$$

et $$\left|\sigma_c\right| \leq C_o / F_c$$

où σ_t = contrainte en tension maximum ou critique autour de l'ouverture

To = résistance en tension de la roche (laboratoire)

Ft = facteur d'inconnu en tension: 4 à 8

σ_c = contrainte en compression maximum ou critique autour de l'ouverture

Co = résistance en compression (laboratoire)

Fc = facteur d'inconnu en compression: 2 à 4

Des facteurs d'inconnu élevés sont recommandés pour une stabilité à long terme et pour les roches possédant des systèmes de joints bien développés, tandis que pour une stabilité à

court terme et pour les roches relativement saines, sans systèmes de joints significatifs, des facteurs d'inconnu plus bas sont utilisés (Duvall, 1977).

Un autre exemple, celui de Goodman et al. (1980), donne pour le calcul de la résistance in situ du pilier "σ_p" la formule suivante:

$$\sigma_p = \frac{qu \cdot N(shape) \cdot N(size)}{F}$$

où qu = résistance en compression non confinée

N(shape) et N(size) = facteurs de correction liés à la forme et aux dimensions du pilier

F = facteur d'inconnu pour diminuer les risques reliés aux hypothèses de conception

Là encore, on observe que pour définir la résistance in situ du pilier, on fait intervenir un facteur d'inconnu. La résistance in situ "σ_p" peut alors être reprise dans l'équation générale "$Fs = \frac{Qu}{P}$" et on obtiendrait la relation suivante qui donne un facteur de sécurité (Fs) déjà pondéré par le premier facteur (F):

$$Fs = \frac{\left[\frac{qu \cdot N(shape) \cdot N(size)}{F}\right]}{P}$$

Ainsi, en pratique, un facteur de sécurité (1) et un facteur d'inconnu (2) sont appliqués dans deux étapes de calcul, (1) dans la relation globale du calcul de la stabilité et (2) dans le calcul de la résistance obtenu sur des échantillons de roche.

Parmi les mines visitées, trois (mines Nos 3, 4 et 6) ont appliqué des facteurs d'inconnu aux valeurs de résistance obtenues en laboratoire. Dans le cas de la mine 6, des facteurs de réduction variant entre 0,25 et 0,90 ont été utilisés pour pondérer la résistance en compression uniaxiale des types de roches rencontrés.

La revue de la littérature donne surtout des équations de dimensionnement reliées aux mines de charbon. En ce qui concerne les mines de métaux, les approches de dimensionnement sont presque absentes.

. Equations de dimensionnement

Pour dimensionner un pilier, il faudra donc déterminer sa résistance dans le contexte de l'environnement des contraintes à sa périphérie. Dans un premier temps, il faudra se choisir un critère de rupture et une équation décrivant la résistance au cisaillement du massif. D'après la revue de la littérature, il semble que le critère de rupture de Mohr-Coulomb soit utilisé en premier analyse, il se formule comme suit:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$$

où $\sigma' = \sigma - u$

où τ : résistance au cisaillement
c' : cohésion
σ' : contrainte effective
σ : contrainte totale
u : pression de l'eau interstitielle

Cette équation est celle d'une droite dont la pente est "tan ϕ" et l'interception est "c'" (voir fig. 2.3).

Une telle relation linéaire est par contre une approximation conservatrice. Dans plusieurs cas, on peut démontrer que la relation n'est pas une droite mais plutôt une parabole. Ceci est bien illustré à la figure 2.4 qui est tirée de Hoek et Bray (1981).

La plupart des auteurs qui traitent de la conception des piliers utilisent seulement un critère de rupture basé sur les contraintes (Logie et Matheson, 1982). Ainsi, on néglige l'effet du temps. Page et Brennen (1983) proposent en plus l'utilisation de critères de déformation pour indiquer quand la fracture du pilier va se produire. Tout en se limitant aux critères de rupture basés sur les contraintes, Logie et Matheson (1982) ont illustré la variété d'équations permettant d'évaluer la résistance d'un pilier. Les équations répertoriées par ces derniers sont décrits au tableau 2.4. A ces données, nous avons ajouté celles trouvées ailleurs dans la littérature.

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$$

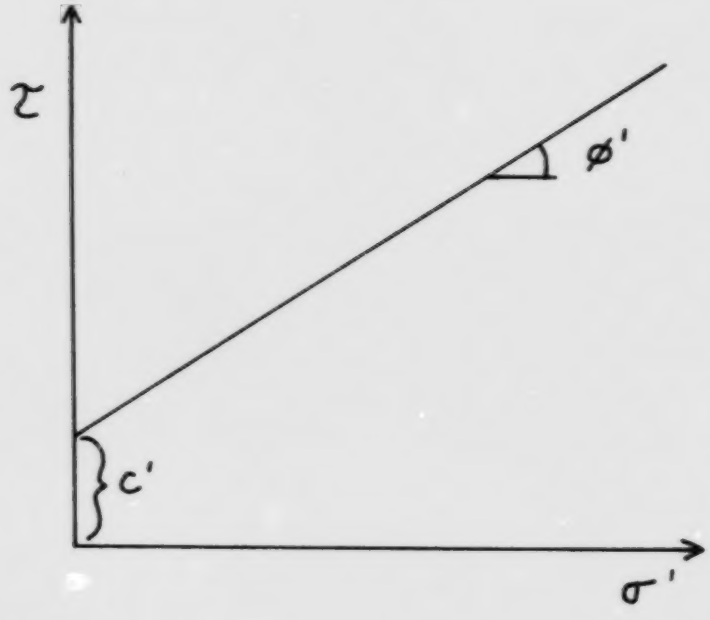


FIG. 2.3 CRITÈRE DE RUPTURE MOHR-COULOMB

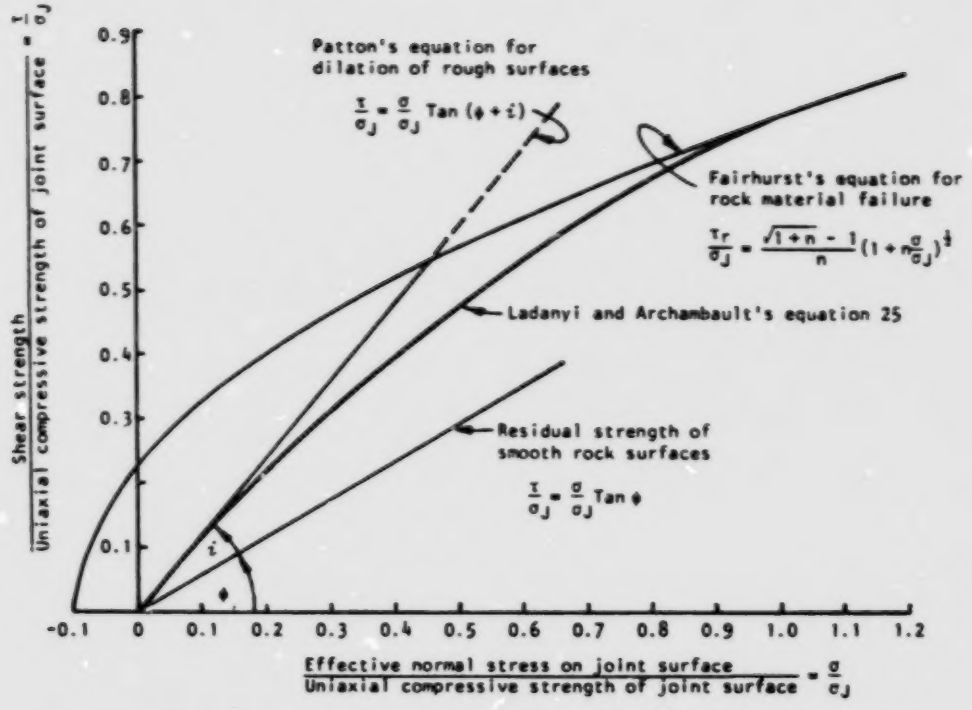


FIG. 2.4 TRANSITION DE LA DILATATION AU CISAILLEMENT PREDIT PAR LES EQUATIONS DE LADANYI ET ARCHAMBAULT
(pour i = 20° et Ø = 30°) figure tirée de Hoek et Bray, 1981.

TABLEAU 2.4: ÉQUATIONS DE DIMENSIONNEMENT DES PILIERS

NO	NOM	ÉQUATIONS	REMARQUES
1	Duvall (1946) Obert et Duvall (1967)	$\sigma_p = \sigma_1 \left(0{,}778 + 0{,}222 \frac{W}{H}\right)$	- σ_p : résistance du pilier (psi) - σ_1 : résistance en compression uniaxiale d'un échantillon cubique - W,H: largeur et hauteur du pilier - Facteur d'inconnu: 2 à 4 - Utilisée pour le charbon
2	Holland et Gaddy (1964)	$\sigma_p = \frac{K (W)^{0,5}}{H}$	- K : coefficient variable selon le type de charbon - Très utilisée en Amérique du Nord - Facteur d'inconnu: 1,8 à 2,2
3	Bieniawski (1967)	$\sigma_p = 1\,100 \frac{W^{0,16}}{H^{0,55}}$ $\sigma_p = 400 + 200 \frac{W}{H}$ $\frac{\sigma p}{\sigma c} = 0{,}645 + 0{,}355 \frac{W}{H}$ $\sigma_p = \left[0{,}64 + 0{,}36 \frac{W}{H}\right]^{\alpha}$	- Échantillon de côté < 60 pouces - Échantillon de côté > 60 pouces - Equation normalisée pour échantillon cubique de 60 pouces - σc : résistance à l'écrasement (psi) - α : 1,4 pour $\frac{W}{H} > 5$ - α : 1,0 pour $\frac{W}{H} < 5$ - Utilisées pour le charbon

TABLEAU 2.4: ÉQUATIONS DE DIMENSIONNEMENT DES PILIERS

NO	NOM	ÉQUATIONS	REMARQUES
4	Salamon et Munro (1967)	$\sigma_p = \bar{\sigma}c \left[\frac{W^{0.46}}{H^{0.66}}\right]$ $\sigma_p = \bar{\sigma}s \, (Wp/Ws)^{0.46} / (Hp/Hs)^{0.66}$	- $\bar{\sigma}c$: résistance en compression d'un cube de 12 pouces (psi) - Équation modifiée pour échantillons de dimensions variables - $\bar{\sigma}s$: résistance en compression du cube (psi) - Wp : largeur du pilier - Ws : largeur de l'échantillon - Hp : hauteur du pilier - Hs : hauteur de l'échantillon - Utilisées pour des schistes bitumineux
5	Wardell (1976)	$S = a \left[\frac{1}{H}\right] + b \left[\frac{W}{H}\right]^{2,0}$	- S : résistance du pilier (psi) - a : constante (1000) - b : constante (20) - Facteur d'inconnu: 1,5 - Utilisée pour le charbon
6	Agapito et Hardy (1982)	$\frac{\overline{\sigma v}}{\overline{\sigma o}} = 1 + B \left[\frac{\overline{\sigma h}}{\overline{\sigma o}}\right]^b$	- $\overline{\sigma v}$: résistance du pilier - $\overline{\sigma o}$: résistance du pilier avec une contrainte horizontale nulle - $\overline{\sigma h}$: contrainte horizontale du pilier - B : constante (3,2) - b : constante (0,82)

TABLEAU 2.4: EQUATIONS DE DIMENSIONNEMENT DES PILIERS

NO	NOM	EQUATIONS	REMARQUES
6	Agapito et Hardy (1982) (suite)	$\overline{\sigma_o} = \sigma_1 \left[\frac{V}{Vi}\right]^{\alpha}$ $\overline{\sigma_h} = (\sigma_{hi})F_1 + (\overline{\sigma_{vp}} - \sigma_{vi})F_2$	- V : volume de l'échantillon - Vi : volume du pilier - α : Coefficient de réduction de volume - σ_{hi} : contrainte initiale horizontale avant le minage - F_1, F_2 : fonction de la forme - $\overline{\sigma_{vp}}$: contrainte verticale moyenne à la mi-hauteur du pilier - σvi : contrainte initiale verticale avant le minage - Utilisées pour les schistes bitumineux
7	Hardy et Agapito (1975)	$\sigma_p = \sigma_s \ (Wp/Ws)^{0,597} / (Hp/Hs)^{0,951}$ $\sigma_p = \frac{\sigma c}{H^{0,354}} \left[\frac{W}{H}\right]^{0,597}$	- Utilisées pour les schistes bitumineux
8	Hustrulid et Swanson (1981)	$\sigma_p = \frac{K}{H^{.50}} \left[\frac{W}{H}\right]^{.50}$	- Utilisée pour le charbon - K : dépend de la résistance en compression et des dimensions des échantillons

TABLEAU 2.4: EQUATIONS DE DIMENSIONNEMENT DES PILIERS

NO	NOM	EQUATIONS	REMARQUES
9	Wilson (1972)	$\sigma_1 = \sigma_o + \sigma_3 \tan \beta$ $\tan \beta = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$ $\frac{y}{h} = \left[\frac{1}{(\tan \beta)^{.50} (\tan \beta - 1)}\right] \cdot \ln \left[\frac{\sigma_v}{\sigma_o}\right]$	- σ_1 : contrainte de rupture - σ_o : résistance en compression non confinée - σ : pression de confinement - tan β :coefficient de contrainte triaxiale - ϕ : angle de friction interne du charbon - y : profondeur de la zone de rupture - h : épaisseur du charbon - σ_v : contrainte maximum du pilier - Utilisées pour le charbon
10	Wilson (1977, 1981)	$r_b = r_o \left[\left(\frac{2q - \sigma_o}{p^* (k+1)}\right)^{\frac{1}{k-1}} - 1\right]$	- r_b : rayon à partir du centre de l'excavation - r_o : rayon de l'excavation - q : champ de contrainte - p : résistance du support plus celle du matériel brisé - K : facteur de contrainte triaxiale $\frac{(1 + \sin \phi)}{1 - \sin \phi}$ - Utilisée pour le charbon. Calcul de la profondeur limite en coordonnées polaires.

TABLEAU 2.4: ÉQUATIONS DE DIMENSIONNEMENT DES PILIERS

NO	NOM	ÉQUATIONS	REMARQUES
11	Duncan et Devane (1983)	$\sigma_1 = \sigma_c + K\,\sigma_3$ $\sigma_1 = \frac{\sigma_c}{f} + K\,\sigma_3$	- σ_1 et σ_3 : contraintes principales majeures (à la rupture) et mineure - σ_c : résistance en compression uniaxiale - K : $\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$ - f : facteur de perturbation de la roche
12	Page et Brennen (1983)	$\frac{1}{\sigma_c} = 3{,}5 \left[\frac{\sigma_3}{\sigma_c}\right]^{0{,}75}$ (compression) $\frac{1}{\sigma_c} = 8 \left[\frac{\sigma_3}{\sigma_c}\right] + 1$ (tension) $\varepsilon = \frac{\sigma_3 - (\sigma_2 + \sigma_1)}{E}$	- ε : déformation de la roche. 500 $\mu\varepsilon$ est est considéré comme inférieur à la rupture. - E : module d'élasticité (module de Young)
13	Hoek et Brown (1980)	$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \left[\frac{m\,\sigma_3}{\sigma_c} + s\right]^{1/2}$	- m et s : constantes qui sont reliées aux propriétés de la roche

TABLEAU 2.4: EQUATIONS DE DIMENSIONNEMENT DES PILIERS

NO	NOM	EQUATIONS	REMARQUES
14	Hedley et al. (1972)	$\sigma_p = \frac{Sv \cos^2\alpha + Sh \sin^2\alpha}{1 - R}$ $Qu + K \frac{w^a}{h^b}$ $F_s = \frac{Qu}{\sigma_p}$	- Sv : contrainte verticale - Sh : contrainte horizontale - α : pendage du dépôt - R : taux d'extraction - Qu : résistance du pilier - w : largeur du pilier - h : hauteur du pilier - K : résistance à la rupture d'un échantillon de 1 pied^3 - a et b : constantes - F_s : facteur de sécurité
15	Goodman et al (1980)	$\sigma_p = \frac{qu \; N\,(shape) \quad N\,(size)}{F}$ $N\,(shape) = (0{,}875 + 0{,}250 \frac{W}{H})$ $N\,(size) = \left[\frac{h}{hi}\right]^{0{,}50}$	- qu : résistance en compression non confinée - H : hauteur de l'échantillon (pression non confinée) - hi : hauteur critique d'un échantillon cubique du charbon - Utilisée pour le charbon

TABLEAU 2.4: ÉQUATIONS DE DIMENSIONNEMENT DES PILIERS

NO	NOM	ÉQUATIONS	REMARQUES
16	Comité Français (1979)	$\sigma_c^L = \sigma_c^{-u} - Ks$	- σ_c^L : contrainte verticale dans le pilier - σ_c^{-u}: moyenne des résistances ultimes - K : constante - s : écart-type des résistance ultimes
17	Yu et Toews (1976)	$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k$ $I_1 = (\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z) = (\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)$ $J_2 = \frac{1}{6}\left[(\sigma_x-\sigma_y)^2 + (\sigma_y-\sigma_z)^2 + (\sigma_z-\sigma_x)^2 + 6(\tau^2_{xy}+\tau^2_{yz}+\tau^2_{zx})\right]$ $\alpha = 2 \sin \phi / (\sqrt{3}\,(3-\sin \phi))$ $k = 6\,C \cos \phi / (\sqrt{3}\,(3-\sin \phi))$	- I_1 : premier invariant du tenseur de contrainte - J_2 : deuxième invariant du tenseur de contrainte (déviation). - α,k: constantes

La première équation permettant le calcul de la résistance d'un pilier est celle présentée par Duvall (1946) sous la forme de

$$\sigma_p = \sigma_1 \left(A + B\frac{W}{H}\right)$$

Cette équation est comparable à celle utilisée par Goodman et al. (1980), sauf que ces derniers ont remplacé le membre $(A + B\frac{W}{H})$ par des facteurs de correction tenant compte de la forme et de la dimension (tableau 2.4, équation 15). Bieniawski (1967) présente aussi une équation comparable sauf qu'il ajoute un exposant "x" qui varie selon la géométrie du pilier.

L'équation qui est la plus utilisée pour calculer la résistance des piliers est celle utilisée par Holland (1964), Bieniawski (1967), Salamon et Monroe (1967), Hustrulid et Swanson (1981) et Hedley (1972):

$$\sigma_p = K \frac{W^a}{H^b}$$

où σ_p : résistance au cisaillement du pilier
K : coefficient variable selon le type de terrain
W : largeur du pilier
H : hauteur du pilier
a, b: constantes variant selon les auteurs

Certains auteurs utilisent des équations normalisées en fonction de la résistance en compression (σ_c) de la roche (Bieniawski, 1967; Agapito et Hardy, 1982, Page et Brennen, 1983; Hoek et Brown, 1980). La plupart des auteurs ne considèrent que les contraintes dans deux dimensions. Yu et Toews (1976) proposent par contre une équation dont la solution est numérique, utilisant les éléments finis, et qui tient compte des trois dimensions:

$$F = x I_1 + \sqrt{J_2} = K$$

Les valeurs de I_1 et J_2 représentent respectivement le premier invariant du tenseur des contraintes et celui du tenseur des contraintes déviatoriques dans les trois dimensions (tableau 2.4).

Le tableau 2.4 illustre donc la variété d'équations disponibles. A ces équations seront parfois ajoutés des facteurs de sécurité additionnels, comme ceux mentionnés antérieurement.

Pour ce qui concerne la mesure de la contrainte appliquée sur le pilier, plusieurs auteurs n'utilisent que le poids statique des terres au droit du pilier. Hedley et al. (1972) proposent de tenir compte des contraintes normales aux discontinuités et du taux d'extraction du minerai:

$$P = \frac{So}{1-R}$$

où So : contrainte normale au gisement, avant le minage
R : taux d'extraction

Pour les opérations en pente, la valeur de So va être modifiée de la facon suivante:

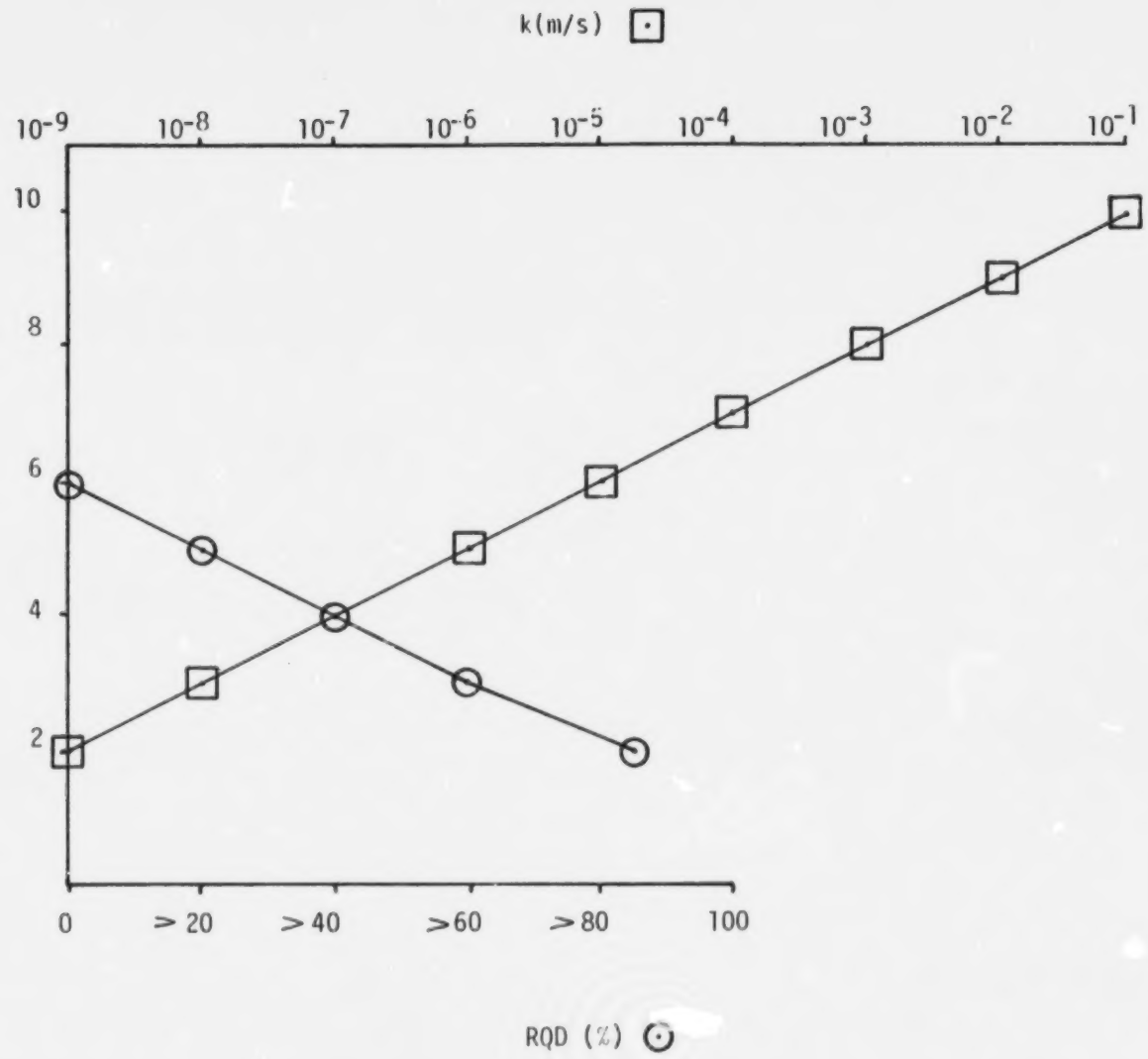
$$So = S_v \cos^2 x + S_n \sin^2 x$$

où x = pendage du gisement

Les deux dernières équations donnent:

$$P = \frac{S_v \cos^2 x + S_L \sin^2 x}{1-R}$$

Comme il peut être constaté, plusieurs approches sont possibles. Dans certains cas, l'emphase est surtout porté sur la mesure en laboratoire de la résistance en compression de l'éprouvette. Alors, on applique un coefficient de correction pour tenter d'adapter la valeur obtenue en laboratoire avec celle du massif. Duncan et Devane (1983) proposent à ce sujet un facteur de correction que l'on peut quantifier à partir d'autres paramètres du massif rocheux. Ainsi, ils tiennent compte de la perméabilité, du RQD... Un exemple graphique est présenté à la figure 2.5.



$$\sigma_1 = \frac{\sigma_c}{f} + K\sigma_3 \qquad \sigma_{mo} = \frac{\sigma_c}{f}$$

FIG. 2.5 EVALUATION DU FACTEUR "f" DE DUNCAN ET DEVANE (1983)

D'autres auteurs suggérant des approches originales sont Lundquist et Heins (1972) qui proposent une approche probabilistique à l'évaluation du changement de la charge. A noter aussi la méthode de Page et Brennen (1983) qui ajoute un critère de rupture basé sur les déformations:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_3 - (\sigma_2 + \sigma_1)}{E}$$

ε = déformation

E = module d'élasticité (Young)

2.4 ..... LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

PROJET: PILIERS DE SURFACE

1-ADLER,L. 1973
A COORDINATED APPROACH - PRELIMINARY AND INTEGRATED ANALYSES
SME MINING ENGINEERING HANDBOOK, AIME, U.S. BUREAU OF MINES,
DEPT. OF THE INTERIOR.
1B 2C ___ 4B 5B ___ 7B 8B ___ ___ ___ ___ 13A ___ ___

2-ALEXANDER,L.G.; MACONOCHIE,D.J.; MATTHEWS,S.M.;TILLMANN,V.H. 1981
OBSERVATIONS AND ANALYSIS OF ROCK DEFORMATION AROUND SOME
OPEN STOPES
DESIGN AND OPERATION OF CAVING AND SUBLEVEL STOPING MINES,
D.R. STEWART EDITOR, SOCIETY OF MINING ENG. OF AIME. NEW
YORK, PP.483-498.
1D 2B ___ 4B ___ 6A ___ ___ 9C 10C ___ ___ ___ ___ __

3-ALLCOTT,G.A.; ARCHIBALD,D.E. 1981
DESCRIPTION OF PILLAR BEHAVIOUR AT HEATH STEELE MINES.
CIM BULLETIN, VOL.74, NO.834 PP.80-87.
1A 2B 3D 4B ___ 6A 7B ___ 9C 10C ___ ___ ___ ___ ___

4-ASKEW,J.; MCCARTHY,P.L.; FITZGERALD,D.J. 1978
BACKFILL RESEARCH FOR PILLAR EXTRACTION AT ZINC CORPORATION
AND NEW BROKEN HILL CONSOLIDATED.
MINING WITH BACKFILL; 12TH CANADIAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM
SUDBURY, ONT. CANADA, MAY 23-25, 1978. CAN INST MIN METALL.,
SPEC. VOL.19, PP.100-110.
1E 2B ___ 4B ___ 6A 7E ___ 9C 10C ___ ___ ___ ___ ___

5-BABCOCK,C.; MORGAN,T.; HARAMY,K. 1981
REVIEW OF PILLAR DESIGN EQUATIONS INCLUDING THE EFFECTS OF
CONSTRAINT.
PROCEEDINGS OF 1ST CONFERENCE ON GROUND CONTROL IN MINING,
MORGANTOWN, W.V., JULY 1981, PP.23-34.
1B 2A ___ 4B 5B ___ 7B ___ ___ 10A ___ ___ ___ ___ ___

6-BABCOCK,C.O.; HOOKER,V.E. 1977
RESULTS OF RESEARCH TO DEVELOP GUIDELINES FOR MINING NEAR SURFACE AND UNDERGROUND BODIES OF WATER.
US DEPT. OF INTERIOR, BUREAU OF MINES, IC.8741, 17 PAGES,
1B 2A 3E 4A 5A ___ 7B 8B 9B 10A ___ ___ ___ ___ ___

7-BAKER,R.F. AND AL. 1972
NEEDED IMPROVEMENTS IN U.S. UNDERGROUND CONSTRUCTION-APPENDIX G, DESIGN ASPECTS.
REPORT OF A PROGRAM FOR IMPROVING THE EFFECTIVENESS OF UNDERGROUND CONSTRUCTION, CONDUCTED BY ASCE & AIME. THE USE OF UNDERGROUND SPACE, TO ACHIEVE NATIONAL GOALS, PP.314-317.
1B 2E ___ ___ ___ ___ ___ 8B ___ ___ ___ ___ 13D ___ ___

8-BALLIVY,G.; DUPUIS,M. 1980
LABORATORY AND FIELD EVALUATION OF THE BONDING STRENGTH OF GROUTED ROCK ANCHORS.
UNDERGROUND ROCK ENGINEERING; 13TH CANADIAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM UNIV. TORONTO, MAY 28-29, 1980. SPECIAL VOLUME-CAN INST OF MIN AND METALL 22, PP.97-102.
1A 2B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ 14A ___

9-BARRETT,J.R.; COULTHARD,M.A.; DIGHT,P.M. 1978
DETERMINATION OF FILL STABILITY
MINING WITH BACKFILL; 12TH CANADIAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM SUDBURY, ONT. CANADA, MAY 23-25, 1978. CAN INST MIN METALL SPEC. VOL.19, PP.85-91.
1F 2D ___ 4B ___ ___ 7E ___ ___ ___ ___ 12A ___ ___ ___

10-BARRETT,J.R.; GRUMITT,B.; WICAL,M. 1979
ARCH FORMATION AND PILLAR YIELD IN JOINTED ROCK.
PROCEEDINGS OF THE 4TH CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, MONTREUX, SWITZERLAND, VOL.2, PP.17-23.
1F 2B ___ 4B 5B 6A 7F ___ 9B 10E ___ ___ ___ ___ ___

11-BARRIENTOS,G.; PARKER,J. 1974
USE OF THE PRESSURE ARCH IN MINE DESIGN AT WHITE PINE.
TRANS SOC MIN ENG AIME VOL.256, NO.1, PP.75-82
1B 2A 3A 4B 5B 6A 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

11b- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J.
ENGINEERING CLASSIFICATION OF ROCK MASSES FOR THE DESIGN OF TUNNEL SUPPORT.
ROCK MECHANICS, VOL. 6, NO 4, 1974, PP 189-236
1C 2D ___ 4C 5A ____ 7F ___ _____ _____ _____ _____ ___ 13A _

12-BELIN,J.; JEGER,C.; DUBART,J.C. 1971
ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'HUMIDIFICATION SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DE QUELQUES ROCHES.
REVUE DE L'INDUSTRIE MINERALE, VOL. 53, NO 1, JAN., PP. 21-30
1C 2D ___ ___ ___ 6C ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

13-BIENIAWSKI,Z.T. 1974
GEOMECHANICS CLASSIFICATION OF ROCK MASSES AND ITS APPLICATION IN TUNNELING.
PROCEEDINGS OF THE 3RD CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, DENVERS, VOL.11A, PP.27-32, 1974.
1E 2A ___ 4C ___ ___ 7F ___ ___ ___ ___ ___ 13A ___ ___

14-BIENIAWSKI,Z.T. 1979
THE GEOMECHANICS CLASSIFICATION IN ROCK ENGINEERING APPLICATIONS.
PROCEEDINGS OF THE 4TH CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, MONTREUX, SWITZERLAND, VOL.2, PP.41-48.
1B 2E ___ 4B 5B ___ 7E ___ ___ ___ ___ ___ 13A ___ ___

15-BIENIAWSKI,Z.T. 1983
IMPROVED DESIGN OF ROOM AND PILLAR COAL MINES FOR U.S. CONDITIONS.
1ST INT. CONF. ON STABILITY IN UNDERGROUND MINING, VANCOUVER B.C. CANADA. AUG. 1982, C.O. BRAWNER EDITOR, A.I.M.E., NEW YORK, PP.19-51.
1B 2A ___ 4B 5B ___ 7B 8B 9B 10A 11A 12A 13D ___ ___

16-BLAKE,W.; HUSTRALID,W.; MAHAUT,J. 1976
DESIGN AND FULL SCALE TESTING OF THE MINING GEOMETRY IN DIV. 2 KAMOTO MINE.
SITE CHARACTERIZATION, 17TH. U.S. SYMP. ROCK MECH., UTAH, AUG. 1976, 3A8-1-10.
1E 2B ___ ___ 5B 6A 7C ___ 9C 10C 11A 12A ___ ___ ___

17-BONVALLET, J.; CHAMBON,C. 1980
DETERMINATION D'UN COEFFICIENT DE SECURITE DANS LES EXPLOITATIONS PAR CHAMBRES ET PETITS PILIERS ABANDONNES.
REVUE FRANCAISE DE GEOTECHNIQUE £13, PP 15-29
1C 2E 3D 4B ___ ___ 7E ___ ___ 10E 11A 12A 13C ___ ___

18-BONVALLET,J.; DEJEAN,M.; SCHWARTZMANN,R. 1978
MEASURE OF STATIC AND DYNAMIC CONSTRAINTS IN THE PILLARS OF UNDERGROUND MINES OF SLIGHT DEPTH.
BULL. LIAISON LABO. PONTS ET CHAUSSEES, NO.98, PP.33-40.
1C 2D 3A ___ 5A 6F ___ ___ ___ 10E ___ ___ ___ ___ ___

19-BRADY,B.H.G. 1981
DETERMINATION OF STABILITY OF UNDERGROUND MINE STRUCTURES.
DESIGN AND OPERATION OF CAVING AND SUBLEVEL STOPING MINES, DANSEL R. STEWART EDITOR, AIME, MINING AND EXPLORATION DIVISION SECTION 7, PP. 427-35.
1B 2C ___ ___ ___ ___ 7C ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

20-BRISSENDEN,W.G. 1980
PILIERS DE SURFACE.
MEMOIRE PRESENTE A LA COMMISSION BEAUDRY, AU NOM DE L'AMMQ, VOL.IV, 27 PAGES.
1A 2D 3E 4A 5A ___ 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

21-BROCH,E.; RYGH,J.A. 1976
PERMANENT UNDERGROUND OPENINGS IN NORWAY - DESIGN APPROACH AND SOME EXAMPLES.
UNDERGROUND SPACE, VOL.1, NO.2, JULY-AUGUST 1976, PP.87-100.
1C 2D ___ ___ 5B ___ 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ 14A ___

22-BROOKS,R.H.; MYERS,R.E. 1979
BLASTHOLE STOPING AT INCO'S BIRCHTREE MINE
CIM BULLETIN, VOL.72, NO.806, PP.68-75.
1A 2B ___ ___ ___ ___ ___ ___ 9C 10C ___ 12B ___ ___ ___

23-CAMPBELL,J.A.L.; PETRONIC,L.J.; MALLIO,W.J. 1975
HOW TO PREDICT LOCAL MINE ROOF CONDITIONS BEFORE MINING
MIN ENG, VOL.27, NO.10, PP.37-40.
1B 2D 3A ___ ___ 6D ___ ___ 9B 10A ___ ___ ___ ___ ___

24-CAVERSON,A.H.; HANNINEN,C.C. 1973
MINE CONVERGENCE MEASUREMENTS AS AN OPERATING TOOL.
MIN ENG (NY) VOL.25, NO.5, PP.40-42.
1B 2B ___ ___ ___ 6A ___ ___ 9B 10C ___ ___ ___ ___ ___

25-CHOQUET,P; TINCELIN,E. 1983
LA METHODE DE DIMENSIONNEMENT DU SOUTENEMENT PAR CINTRES DES VOIES DE TAILLE DES CHARBONNAGES OUEST-ALLEMANDS:POSSIBILITE D'INTRODUCTION DANS D'AUTRES BASSINS HOUILLERS.
INDUSTRIE MINERALE - LES TECHNIQUES, AVRIL 1983
1C 2D ___ ___ ___ 6C 7F ___ 9B 10A ___ ___ ___ ___ ___

26-CLELAND,R.S.; SINGH,K.H. 1973
DEVELOPMENT OF "POST" PILLAR MINING AT FALCONBRIDGE NICKEL MINES LIMITED
CIM BULLETIN, VOL.66, NO.732, PP.57-64.
1A 2E ___ 4B 5B 6A 7B ___ 9D 10C ___ 12A ___ ___ ___

27-COATES,D.F. 1971
DISCUSSION OF M.D.G. SALAMON'S PAPER STABILITY, INSTABILITY AND DESIGN OF PILLAR WORKINGS.
INT J.ROCK MECH.MIN. SCI. VOL.8, NO.6, PP.641-642.
___ 2C ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

28-COATES,D.F. 1973
VARIANCE OF PILLAR STRESSES AT ELLIOT LAKE
INT.J. OF ROCK MECH. MIN. SCI. GEOMECH.ABSTR. VOL 10, PP.627-640.
1A 2D ___ ___ ___ ___ 7E ___ ___ ___ ___ 12A ___ ___ ___

29-COATES,D.F. 1974
PROBABILITY OF PILLAR FAILURE AT ELLIOT LAKE
PROC. THIRD INTERNATIONAL CONGRESS ON ROCK MECHANICS, I.S.R.M., DENVER, VOL 2, PART B, SEPT. 1-7 1974, PP. 990-96.
1A 2D ___ 4B ___ 6A 7E ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

30-COATES,D.F. 1981
ROCK MECHANICS PRINCIPLES (BOOK)
CANMET-MONOGRAPH 874 (REVISED 1981), ENERGY, MINES AND RESOURCES CANADA.
1A 2A ___ 4B 5B 6C 7E ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

31-COATES,D.F.; DICKHOUT,M. 1973
GROUND CONTROL IN DEEP MINING.
SME MINING ENGINEERING HANDBOOK, AIME, U.S. BUREAU OF MINES, DEPT. OF THE INTERIOR.
___ 2E ___ 4B 5B 6C 7B __ __ __ __ __ __ __ __

32-COMITE FRANCAIS DE MECANIQUE DES ROCHES. 1979
ROLE DE L'AUSCULTATION DANS LA CONCEPTION ET L'EXECUTION D'OUVRAGES SOUTERRAINS
PROCEEDINGS OF THE 4TH CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, MONTREUX, SWITZERLAND, VOL.1, PP.773-786.
1C 2E ___ 4B ___ 6C 7B __ __ __ __ __ __ __ __

33-COMITE FRANCAIS; RAFFOUX,J.F. (RAPPORTEUR) 1979
RECENTS DEVELOPPEMENTS DANS L'APPROCHE GEOTECHNIQUE DE L'ABATTAGE MECANISE EN FRANCE
PROCEEDINGS OF THE 4TH CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, MONTREUX, SWITZERLAND, VOL.1, PP.787-799.
1C 2D 3D ___ ___ 6C __ __ __ __ __ __ __ __

34-COMMISSION D'ENQUETE SUR LA TRAGEDIE DE LA MINE BELMORAL. 1981
VOLUME 1: RAPPORT FINAL SUR LES CIRCONSTANCES, LES CONDITIONS PREALABLES ET LES CAUSES DE LA TRAGEDIE DU 20 MAI 1980
GOUVERNEMENT DU QUEBEC, 284 PAGES.
1A 2A 3C __ __ __ __ __ 9C 10C ___ 12B __ __ __

35-COMMISSION D'ENQUETE SUR LA TRAGEDIE DE LA MINE BELMORAL. 1982
VOLUME 3: LA SECURITE DANS LES MINES SOUTERRAINES.
GOUVERNEMENT DU QUEBEC, CONSEIL EXECUTIF, 342 PAGES.
1A __ __ __ __ __ __ 8B __ __ __ __ __ __ __

36-CORDING,E.J. 1977
CONTROL OF GROUND MOVEMENTS AND SUPPORT OF TUNNELS - RESEARCH AND PRACTICE.
UNDERGROUND SPACE, VOL.2, NO.2, DECEMBER 1977, PP.113-119.
1B 2E ___ 4C ___ 6C __ __ __ __ __ __ __ 14A ___

37-CRUDEN,D.M. 1970
GEOLOGY OF THE ROCK SALT MINE AT GODERICH, ONTARIO.
ENERGY, MINES AND RESOURCES CANADA, MINES BRANCH, MINING RESEARCH CENTRE, INTERNAL REPORT, MF 70/68, JULY 1970, 19P.
(REF 22).
1A 2D ___ ___ ___ 6C 7A ___ 9A 10B ___ ___ ___ ___ ___

38-CUMMINGS,R.A. ET AL 1983
EFFECT OF ATMOSPHERIC MOISTURE ON THE DETERIORATION OF COAL MINE ROOF SHALES.
MIN. ENG, VOL. ?, NO ?, MARCH, PP. 243-5.
1B 2D ___ ___ ___ ___ 7F ___ 9B 10A ___ ___ ___ ___ ___

39-CUNDALL,P.; SHILLABEER,J.H.; HERGET,G. 1978
MODELLING TO PREDICT BACKFILL STABILITY IN TRANSVERSE PILLAR EXTRACTION
MINING WITH BACKFILL, 12TH CANADIAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM
CAN INST MIN METALL SPECIAL VOLUME 19 SUDBURY, ONT. CANADA.
1A 2C ___ 4B ___ ___ 7C ___ ___ ___ ___ 12A ___ ___ ___

40-DAUGHERTY,R.A. 1973
ROOF STABILIZATION THROUGH CHEMICAL ADDITIVES.
SME MINING ENGINEERING HANDBOOK, AIME, U.S. BUREAU OF MINES, DEPT. OF THE INTERIOR.
1B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ 14C ___

41-DEJEAN,M.; ARCAMONE,J. 1979
AFFAISSEMENTS MINIERS ET DEFORMATION DU SOL INFLUENCE DE LA LITHOLOGIE DU RECOUVREMENT
PROCEEDINGS OF THE 4TH CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, MONTREUX, SWITZERLAND, VOL.1, PP.597-603.
1C 2B 3A 4A 5A 6A 7C ___ 9B 10A 11A 12A ___ ___ ___

42-DEJEAN,M.; MARTIN,F.; RAFFOUX,J.F. 1971
DEFORMATION DES GALERIES AU ROCHER SOUS L'INFLUENCE D'UNE EXPLOITATION
REVUE DE L'INDUSTRIE MINERALE, VOL 53, NO 1, JAN., PP. 32-39
1C 2D ___ ___ ___ 6C 7F ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

43-DENNIS,Z.F. 1973
BEHAVIOUR OF ROOMS AND PILLARS IN DEEP POTASH MINES
CIM BULLETIN, VOL.66, NO.735, PP.60-65.
___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

44-DILEO,D.; MORRISON,D.M.; GIRARD,N.A. 1983
CASE HISTORY OF A GROUNDFALL AT FALCONBRIDGE'S EAST MINE.
PAPER PRESENTED AT THE CIM SYMPOSIUM ON UNDERGROUND SUPPORT SYSTEMS SPONSORED BY THE CANADIAN NATIONAL COMMITEE ON ROCK MECHANICS, SEPTEMBER 20-21, SUDBURY, ONTARIO, CANADA.
1A 2B 3D ___ ___ 6A 7E ___ 9C 10C ___ 12B ___ 14B ___

45-DUNCAN,N.; DEVANE,M.A. 1983
GEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL CRITERIA FOR ASSESSING THE STABILITY OF INCLINES, HEADINGS AND TUNNELS IN ROCK
1ST INT. CONF. ON STABILITY IN UNDERGROUND MINING,VANCOUVER, B.C. CANADA, AUG. 1982, C.O. BRAWNER EDITOR, A.I.M.E., NEW YORK, PP.136-164.
1B 2C ___ 4B ___ ___ 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

46-DUVALL,W.I. 1977
GENERAL PRINCIPLES OF UNDERGROUND OPENING DESIGN IN COMPETENT ROCK.
PROC. 17TH ROCK MECH. SYMPOSIUM, AIME, NEW YORK, PP.101-111.
1B 2A ___ 4B 5B 6D 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

47-DYSON,L.A. 1971
A ROCK MECHANICS SURVEY AND ITS USE IN AN UNDERGROUND STABILITY ANALYSIS AT KAMBALDA, W.A.
PROC. 1ST. AUST. NEW ZEALAND CONFER. GEOMECH., V.1, MELBOURNE, AUG. 1971, PP.67-72.
1F 2E ___ ___ 5B 6C 7C ___ 9B 10C ___ ___ ___ ___ ___

48-FAIRHUST,C. 1973
LABORATORY TESTING OF ROCK AND ITS RELEVANCE TO MINE DESIGN.
SME MINING ENGINEERING HANDBOOK, AIME, U.S. BUREAU OF MINES, DEPT. OF THE INTERIOR.
1B 2E ___ 4B 5B ___ 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

49-FAIRHUST,C. 1974
ROOFBOLTING IN HORIZONTALLY LAMINATED ROCK
ENG MIN J., FEBRUARY 1974, PP.80-90.
1B 2E ___ ___ ___ 6C 7E ___ ___ ___ ___ ___ ___ 14A ___

50-FARNSWORTH,D.J.M. 1977
INTRODUCTION TO AND BACKGROUND OF SULPHIDE FIRES IN PILLAR MINING AT THE SULLIVAN MINE
CIM BULLETIN, VOL.70, NO.782, PP.65-71.
1A ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

51-FINE,J.; TINCELIN,E.; VOUILLE,G. 1971
DETERMINATION DE LA STABILITE DES EDIFICES SOUTERRAINS, GALERIES, TUNNELS, PILIERS, GRANDE CAVITES.
REVUE DE L'INDUSTRIE MINERALE, VOL. 53, NO 2, FEV., PP. 117-122
1C 2E ___ 4A ___ 6A 7C ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

52-FISEKCI,M.Y. 1978
PROGRAM UPDATE ON STRATA MECHANICS (GROUND CONTROL) STUDIES AT THE HYDRAULIC MINE.
CANADA CENTRE FOR MINERAL AND ENERGY TECHNOLOGY (CANMET) - MINING RESEARCH LAB., REPORT ERP-MRI/ 78-99 JULY, 22 PAGES.
1A 2D ___ ___ ___ 6D ___ ___ 9B 10A ___ ___ ___ ___ ___

53-GEIS,H.P. 1979
CAVE-IN AND SUBSIDENCE AT THE RODSAND MINE, WESTERN NORWAY.
PROCEEDINGS OF THE 4TH CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, MONTREUX, SWITZERLAND, VOL.1, PP.645-648.
1C 2D ___ ___ ___ 6C ___ ___ ___ 10C ___ ___ ___ ___ ___

54-GIBBONS,M. 1980
LOW FREQUENCY MICROSEISMS IN RELATION TO MINE ROOF STABILITY
2ND CONFERENCE ON ACOUSTIC EMISSION MICROSEISMIC ACTIVITY IN GEOLOGIC STRUCTURES AND MATERIALS, PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY, NOV. 1978, 1980, ED H.R. HARDY AND F.W. LEIGHTON, 245-57.
1B ___ ___ ___ ___ 6E ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

55-GIGER,M.W.; KRIZEK,R.J. 1970
BONDS FOR TUNNEL ROOF SUPPORT
RAPPORT TECHNIQUE DU "DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, THE TECHNOLOGICAL INSTITUTE" NORTHWESTERN UNIVERSITY, EVANSTON, ILLINOIS, 60201.
1B 2C 3A 4C ___ ___ 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

56-GILL,D.E. 1981
LA MECANIQUE DES ROCHES ET LE DESIGN DES PILIERS DE MINES. DEUXIEME REUNION DU DISTRICT £2 DE L'INST. CAN. DES MINES ET DE LA METAL. 27-30 SEPT. 1981 (VAL D'OR, P.Q. CANADA).
1A 2E ___ ___ ___ 6D 7E ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

57-GOLSER,J. ET AL. 1981
TUNNELING UNDER EXTREME ROCK PRESSURES AT THE LOKTAK PROJECT PROC. OF THE 22ND U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS. ROCK MECHANICS FROM RESEARCH TO APPLICATION. PUBLISHED BY THE MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, JUNE 1981, CAMBRIDGE, MASS. U.S.A. PP. 319-24.
1I 2B ___ 4C ___ 6C 7F ___ ___ ___ ___ ___ 13A ___ ___

58-GOODMAN,R.; KORBAY,S.; BUCHIGNANI,A. 1980
EVALUATION OF COLLAPSE POTENTIAL OVER ABANDONED ROOM AND PIL LAR MINES.
BULL ASSOC ENG GEOL, VOL.XVIIM NO.1, WINTER 1980, PP.27-37.
1B 2D 3A 4B 5B ___ 7B ___ 9B 10A 11A 12A ___ ___ ___

59-GRANT,F. 1976
ROOF SUPPORT ASSESSMENT OF PRINCE MINE, POINT ACONI, N.S.
CANMET, M.B.L., REP. 76-96, 24 PAGES.
1A 2D ___ ___ ___ ___ 7F ___ 9B 10A 11A 12A ___ 14A ___

60-GRANT,F. 1977
A REVIEW OF HISTORICAL UNDERGROUND COAL MINE STRATA CONTROL PARAMETERS IN WESTERN CANADA IN RELATION TO THE REQUIREMENTS FOR PRESENT AND FUTURE COAL MINES.
CANMET, M.B.L., REP. 77-101, 21 PAGES.
1A 2E ___ ___ 5B ___ 7B ___ ___ 10A 11A 12A ___ ___ ___

61-GROUND CONTROL RESEARCH GROUP 1970
GROUND MOVEMENT ASSOCIATED WITH PILLAR REMOVAL
ENERGY, MINES AND RESOURCES CANADA, MINES BRANCH, MINING RESEARCH CENTRE, INTERNAL REPORT MR 70/102-ID, OCT. 1970, 21 PAGES.
1A 2D ___ 4B 5B 6A 7C ___ 9B 10E ___ ___ ___ ___ ___

62-GUANG,M.; JINSHOU,H. 1983
SOME ASPECTS OF ROCK STRESS MEASUREMENTS IN THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA.
1ST INT. CONF. ON STABILITY IN UNDERGROUND MINING, VANCOUVER, BC. CANADA, AUG. 1982, C.O. BRAWNER EDITOR, NEW YORK, PP.642-652.
1I 2E ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

63-HALL,B.M.; DOWDING,C.H.
PREDICTION OF SUBSIDENCE FROM FULL EXTRACTION COAL MINING. PROC. OF THE 22ND U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS. ROCK MECHANICS FROM RESEARCH TO APPLICATION. PUBLISHED BY THE MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, JUNE 1981, CAMBRIDGE, MASS, U.S.A. PP. 325-29
1B 2E ___ ___ ___ 6C 7E ___ 9B 10A 11A 12A ___ ___ ___

64-HAMBLEY,D.F.; HEDLEY,D.G.F.; MORGAN,G.M. 1980
USE OF THE ANALOG AND COMPUTER MODELS IN THE ELLIOT LAKE URANIUM MINE.
UNDERGROUND ROCK ENGINEERING; 13TH CANADIAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM UNIV. TORONTO, ONT. CANADA, MAY 28-29, 1980, SPECIAL VOLUME - CANADIAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY 22, PP.151-161.
1A 2C ___ 4B ___ ___ 7C ___ 9B 10E ___ 12A ___ ___ ___

65-HANNINEN,C.C.; THALER,J.H.; MCGUNEGLE,B.F. 1973
UTILIZATION OF ROCK MECHANICS BY MANAGEMENT.
SYMP. 15TH. ROCK MECH, SEPT. 1973, SOUTH DAKOTA, 603-38, (REF 11).
1B 2B 3A 4A ___ ___ 7B 8B ___ 10C ___ ___ 13C ___ ___

66-HARDY,M.P.; AGAPITO,J.F.T. 1975
ETUDE DES PILIERS DANS UNE MINE DE SCHISTES BITUMINEUX
SIXTEENTH SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, PP.257-266.
1A 2B 3D 4B 5B ___ 7B ___ 9B 10A ___ ___ ___ ___ ___

67-HEBBLEWHITE,B.K.; POTTS,E.L.J.; MILLER,H.D.S. 1979
THE DESIGN OF UNDERGROUND MINING LAYOUTS FOR A DEEP POTASH MINE ON THE BASIS OF ROCK MECHANICS INVESTIGATIONS
PROCEEDINGS OF THE 4TH CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, MONTREUX. SWITZERLAND, VOL.2, PP.219-226.
1D 2D 3D 4B 5B 6A 7F ___ 9B 10E ___ 12A ___ ___ ___

68-HEDLEY,D.G.F. 1967
AN APPRAISAL OF CONVERGENCE MEASUREMENTS IN SALT MINES.
ENERGY, MINES AND RESOURCES CANADA, MINES BRANCH, MINING RESEARCH CENTRE, REPORT, FMP 67/10-MRL, 29 PAGES.
___ 2C ___ ___ ___ 6A ___ ___ 9A 10B ___ ___ ___ ___ ___

69-HEDLEY,D.G.F. 1972
GROUND CONTROL PROGRAM 1972-73.
ENERGY, MINES AND RESOURCES CANADA, MINES BRANCH, MINING RESEARCH CENTRE, INTERNAL REP. 72/49, 28 PAGES.
1A 2B ___ 4B 5B 6D 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

70-HEDLEY,D.G.F. 1973
NOTES OR ROCK MOVEMENT MEASUREMENTS WITH BOREHOLE EXTENSOMETERS.
ENERGY, MINES AND RESOURCES CANADA, MINE BRANCH, MINING RESEARCH CENTRE, INTERNAL REPORT 731/151.
1A ___ ___ ___ ___ 6D ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

71-HEDLEY,D.G.F. 1975
EFFECT OF GEOLOGICAL FACTORS ON STOPE AND PILLAR LAYOUT IN AN ELLIOT LAKE URANIUM MINE
CIM BULLETIN, VOL.68, NO.755, PP.107-12.
1A 2B ___ ___ ___ ___ 7A ___ 9B 10E ___ 12A ___ ___ ___

72-HEDLEY,D.G.F.; GRANT,F. 1972
STOPE AND PILLAR DESIGN FOR THE ELLIOT LAKE URANIUM MINES.
CIM BULLETIN, PP.37-44.
1A 2E ___ 4B 5B ___ 7E ___ ___ 10E ___ ___ ___ ___ ___

73-HEDLEY,D.G.F.; HERGET,G. 1968
PRELIMINARY ROCK MECHANIC INVESTIGATIONS AT GASPE COPPER MINES LTD.
ENERGY, MINES AND RESOURCES CANADA, MINES BRANCH, MINING RESEARCH CENTRE, REPORT, MR-68/72, 10 PAGES.
1A 2B ___ ___ ___ 6D 7B ___ 9A 10C ___ 12A ___ ___ ___

74-HEDLEY,D.G.F.; HERGET,G.; MILES,P.; YU,Y.S. ?
RECHERCHE SUR LA MECANIQUE DES ROCHES EFFECTUEE A LA MINE DE KIDD CREEK PAR CANMET.
CANADA CENTER FOR MINERAL AND ENERGY TECHNOLOGY.
1A 2B 3A 4B 5A 6D 7E ___ 9A 10C ___ ___ ___ ___ ___

75-HEDLEY,D.G.F.; MORGAN,G.; HEMBLEY,D.F. 1979
REGIONAL STABILITY IN THE ELLIOT LAKE MINES, PT. 2, THE DENISON - PANEL BOUNDARY.
CANADA CENTRE FOR MINERAL AND ENERGY TECHNOLOGY, MINING RESEARCH LAB, REPORT MBL-MRP 73-93, SEPT. 1979, 10 PAGES.
1A 2A ___ 4B 5B ___ 7B 8B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

76-HEDLEY,D.G.F.; WILSON,J.C. 1975
ROCK MECHANICS APPLICATIONS IN CANADIAN UNDERGROUND MINES.
CIM BULLETIN, NOV. 1975, PP.61-73, (REF 52).
1A 2A 3D 4B 5B 6C ___ ___ ___ ___ 11A ___ ___ ___ ___

77-HEDLEY,D.G.F.; ZAHARY,G.; SODERLUND,H.W.; COATES,D.F. 1968
UNDERGROUND MEASUREMENTS IN A STEEPLY DIPPING OREBODY
PROC. OF 5TH CANADIAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM, TORONTO, PP.105-125.
1A 2B ___ 4B ___ 6F 7E ___ 9C 10C ___ 12B ___ ___ ___

78-HEUZE,F.E. ?
DESIGN OPTIMIZATION FOR MULTIPLE ROCK CAVERNS.
?
1B 2E ___ 4B 5B ___ 7E 8B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

79-HIRAMATSU,Y.; OKA,Y.; KAMEOKA,Y. 1979
PILLAR ROBBING SUPPORTED BY FIELD MEASUREMENTS IN YAMAHARA MINE.
PROCEEDINGS OF THE 4TH CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, MONTREUX, SWITZERLAND, PP.235-241.
1I 2D ___ ___ ___ 6A ___ ___ 9A 10C ___ ___ ___ ___ __

80-HOEK,E., BROWN,E.T. 1980
UNDERGROUND EXCAVATIONS IN ROCK.
INSTITUTION OF MINING AND METALLURGY, LONDON, 527 PAGES,1980
HOEK,E.; BROWN,E.T.
1D 2A ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ 13A ___ __

81-HOEK,E.;BRAY,J.W. 1981
ROCK SLOPE ENGINEERING - REVISED THIRD EDITION
INSTITUTION OF MINING AND METALLURGY,LONDON,358 PAGES,1981
1D 2D ___ ___ ___ 6C 7E ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

82-HOLLAND,C.T. 1973
COAL MINE PILLARS FOR PERMANENT OR SEMI-PERMANENT SUPPORT OF THE OVERBURDEN.
PROC. 9TH CANADIAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM, MONTREAL, PP.113-139.
1B 2E 3A 4B 5B ___ 7B ___ 9B 10A ___ ___ ___ ___ ___

83-HOLLAND,C.T. 1973
MINE PILLAR DESIGN.
SME MINING ENGINEERING HANDBOOK, AIME, U.S. BUREAU OF MINES, DEPT. OF THE INTERIOR.
1B 2E ___ 4B 5B ___ 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

84-HOUPERT,R. 1979
LE COMPORTEMENT A LA RUPTURE DES ROCHES
PROCEEDINGS OF THE 4TH CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, MONTREUX, SWITZERLAND, PP.115-122.
1C 2D ___ 4B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

85-IGNATIEFF,A. 1968
A REVIEW OF ROCK MECHANICS APPLICATIONS IN CANADIAN BEDDED DEPOSITS.
CIM BULLETIN, NO.678, OCT. 1968, PP.1180-1184.
1A ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

86-JAMES,C.E.; BEDFORT,D.J. 1977
POST PILLAR CUT AND FILL STOPING AT THE DOLPHIN MINE OF KING ISLAND SCHEELITE.
AUST. INST. MNG METALL. CONFER., TASMANIA, MAY 1977, 227-35.
1F 2E ___ 4B 5B 6A 7F ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

87-JEREMIC,M.L. 1978
A CASE HISTORY OF GROUND BEHAVIOR IN TRANSVERSE CUT AND FILL MINING AT CHOKA DULKAN, BOR COPPER MINE, YUGOSLAVIA.
MIN ENG, VOL.30, NO.4, PP.374-378.
1C 2B ___ 4B 5B ___ 7B ___ 9A 10C ___ 12A ___ ___ ___

88-JOHN,K.W.; BAUDENDISTEL,M. 1981
A COMPROMISE APPROACH TO TUNNEL DESIGN
PROC. OF THE 22ND U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS. ROCK MECHANICS FROM RESEARCH TO APPLICATION. PUBLISHED BY THE MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, JUNE 1981, CAMBRIDGE, MASS. U.S.A. PP. 333-41.
1C 2E ___ 4C ___ 6C 7E ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

89-KANJI,M.A. 1979
SURFACE DISPLACEMENTS AS A CONSEQUENCE OF EXCAVATION ACTIVITIES
PROCEEDINGS OF THE 4TH CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, MONTREUX, SWITZERLAND, VOL.3, PP.345-368.
1G 2C 3D ___ ___ ___ 7E ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

90-KERSTEN,R.W.O. 1982
DESIGN OF PILLARS IN SHRINKAGE STOPING
SOCIETY OF MINING ENGINEERS OF AIME FIRST INTERNATIONAL SME-AIME FALL MEETING, HONOLULU, HAWAII SEPT. 1982, PRE-PRINT NB 82-304
1E 2A ___ 4B 5B ___ 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

91-KRIPAKOV,N.P. 1981
FINITE ELEMENT ANALYSIS OF YIELD-PILLAR STABILITY
COMPUTERS ANS STRUCTURES, VOL. 13, PP. 575-93. (PROC. OF THE ADINA CONF. 3RD, CAMBRIDGE, MASS, JUNE 10-12, 1981)
1B 2C 3A 4B 5B 6A 7C ___ 9B 10A 11A 12A ___ ___ ___

92-LAUBSCHER,D.H. 1977
GEOMECHANICS CLASSIFICATION OF JOINTED ROCK MASSES-MINING APPLICATIONS
TRANSACTIONS/SECTION A, INSTITUTION OF MINING AND METALLURGY VOL.86, PP.A-AB, 1977.
1E 2A ___ 4B ___ ___ 7F ___ ___ ___ 11A ___ 13A ___ ___

93-LEIGHTON,F. 1983
GROWTH AND DEVELOPMENT OF MICROSEISMICS APPLIED TO GROUND CONTROL AND MINE SAFETY.
MIN. ENG. VOL.35,NO.8,AUGUST, PP. 1157-1162
1B 2D ___ 4B ___ 6E 7F ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

94-LOGIE,C.V.; MATHESON,G.M. 1983
A CRITICAL REVIEW OF THE CURRENT STATE-OF-THE-ART DESIGN OF MINE PILLARS.
1ST INT. CONF. ON STABILITY IN UNDERGROUND MINING, VANCOUVER, BC. CANADA, AUG. 1982, C.O. BRAWNER EDITOR, A.I.M.E., NEW YORK, PP.359-382.
1B 2A ___ 4B 5B ___ 7E ___ ___ 10A ___ ___ 13D ___ ___

95-LOOFBOUROW,R.L. 1983
INFLUENCE AND CONTROL OF WATER IN UNDERGROUND MINING.
1ST INT. CONF. ON STABILITY IN UNDERGROUND MINING, VANCOUVER, BC. CANADA, AUG. 1982, C.O. BRAWNER EDITOR, A.I.M.E., NEW YORK, PP.182-190, 1983.
1B 2D ___ ___ ___ ___ 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

96-LUNDQUIST,R.G.; HEINS,R.W. 1972
ROCK STRUCTURE DESIGN BY FAILURE PROBABILITIES.
14TH SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, PENN. STATE UNIVERSITY, JUNE 11-14, 1972, PAPER 16, PP.329-337.
1A 2C ___ 4B ___ ___ 7D ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

97-MATHEWS,K.E.; HAMMETT,R.D.; STEWART,S.B. 1983
CASE EXAMPLES OF UNDERGROUND MINE STABILITY INVESTIGATIONS.
1ST INT. CONF. ON STABILITY IN UNDERGROUND MINING, VANCOUVER, BC. CANADA, AUG. 1982, C.O. BRAWNER EDITOR, NEW YORK, PP.829-846.
1A 2A ___ 4B 5B ___ 7C ___ ___ ___ ___ ___ 13A ___ __

98-MAURY,V. 1979
SPONTANEOUS SUBSIDENCE- THE SYNTHESIS OF OBSERVATIONS AND THE POSSIBILITY OF AN INITIATING MECHANISM OF HYDRAULIC PRESSURE.
IND MINER (S ETIENNE FR), PP.511-522.
1C 2A 3A 4A 5A ___ 7B ___ 9B 10D ___ 12A ___ ___ ___

99-MCDONOUGH,J.T. 1976
SITE EVALUATION FOR CAVABILITY AND UNDERGROUND SUPPORT DESIGN AT THE CLIMAX MINE.
MONOGRAPH ON ROCK MECHANICS APPLICATIONS IN MINING. W.S. BROWN, S.J. GREEN, W.A. HUSTRULID, EDITORS, PROC. OF 17TH SYMPOSIUM OR ROCK MECHANICS, SNOWBIRD, UTAH, AUGUST 1976, PP.112-126.
1B 2D ___ ___ ___ ___ 7F ___ ___ ___ ___ ___ 13A ___ ___

100-MERRITT,A.H.; BAECHER,G.B. 1981
SITE CHARACTERIZATION IN ROCK ENGINEERING
PROC. OF THE 22ND U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS. ROCK MECHANICS FROM RESEARCH TO APPLICATION. PUBLISHED BY THE MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, JUNE 1981, CAMBRIDGE, MASS, U.S.A. PP. 49-66
1B 2A ___ 4C ___ ___ 7B ___ ___ ___ ___ ___ 13D ___ ___

101-MILLER,D.R.; BARRETT,J.R. 1979
JOINTED ROCK MASS CHARACTERISTICS AND THEIR INFLUENCE ON SLENDER PILLARS.
PROC SYMP ROCK MECH 20TH, AUSTIN, TEX, USA, JUNE 4-6 1979.
PUBL BY UNIV OF TEX, AUSTIN, USA, PP.199-208.
1B 2E ___ 4B ___ ___ 7E ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

102-MIZUKOSHI,T.; MIMAKI,Y. 1979
THE BEHAVIOR OF BEDROCK BY THE LARGE CAVERN OPENING AND COMPARISON WITH THE ANALYSIS.
PROCEEDINGS OF THE 4TH CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, MONTREUX, SWITZERLAND, 1979, 439-46, (REF 2).
1I 2E ___ 4C ___ 6D 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ 14B ___

103-MORRISON,R. 1976
A PHILOSOPHY OF GROUND CONTROL.
DEPT. MNG METALL. ENG, MCGILL UNIV., MONTREAL, 1976, 182 PAGES, (REF 109).
1A 2C ___ 4B 5B ___ 7A ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

104-MRAZ,D.Z.F. 1973
BEHAVIOR OF ROOMS AND PILLARS IN DEEP POTASH MINES.
THE CANADIAN MINING AND METALLURGICAL BULLETIN (CIM) JULY.
1A 2C ___ ___ ___ ___ 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

105-MUIR,WOOD.A.M. 1979
GROUND BEHAVIOR AND SUPPORT FOR MINING AND TUNNELLING.
TRANS. INST. MNG METALL.
1D 2C ___ 4C ___ ___ 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

106-MYRVANG,A.M. 1979
PRACTICAL USE OF ROCK STRESS AND DEFORMATION MEASUREMENTS IN THE NORWEGIAN MINING INDUSTRY.
PROCEEDINGS OF THE 4TH CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, MONTREUX, SWITZERLAND, PP. 459-65.
1C 2B ___ ___ ___ 6A 7F ___ ___ 10D ___ ___ ___ ___ ___

107-NEFF,T.L. 1972
QUALITATIVE FACTORS FOR EVALUATING STABILITY
FOURTEENTH SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, PAPER 16 PENN.STATE UNIVERSITY, USA, 311 PAGES, JUNE 1972.
1B 2D ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ 14A ___

108-OBERT,L.; DUVALL,W. 1973
DESIGN AND STABILITY OF EXCAVATIONS IN ROCK- SUBSURFACE
SME MINING ENGINEERING HANDBOOK, AIME, U.S. BUREAU OF MINES, DEPT. OF THE INTERIOR.
1B 2C ___ 4B 5B ___ 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

109-OKO,U.M.; TAYLOR,W.L.W. 1974
TREATMENT OF ACID MINE WASTEWATER AT FALCONBRIDGE'S HARDY CROWN PILLAR PROJECT.
CIM BULLETIN, APRIL 1974, PP.43-49 (2 REFS).
1A ___ 3A ___ 5A ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

110-ORCHARD,R.J. 1969
THE CONTROL OF GROUND MOVEMENTS IN UNDERSEA WORKING.
MIN ENG (LONDON), NO.101, FEB. 1969, PP.259-273.
1D 2A 3A 4A 5A 6A 7A 8C 9B 10A 11A 12A ___ ___ ___

111-ORCHARD,R.J. 1975
WORKING UNDER BODIES OF WATER
MIN ENG (LONDON),MARCH 1975,P.P. 261-270
1D 2A 3B 4A 5A 6A 7E 8B 9B 10A 11A 12A ___ ___ ___

112-PAGE,C.H.; BRENNEN,R.G. 1983
STABILITY OF LARGE OPEN STOPES IN WEAK ROCK.
1ST INT. CONF. ON STABILITY IN UNDERGROUND MINING, VANCOUVER, BC. CANADA, AUG. 1982, C.O. BRAWNER EDITOR, A.I.M.E., NEW YORK, PP.336-356.
1E 2A 3E 4A 5A ___ 7C ___ 9A 10C ___ ___ ___ ___ ___

113-PANEK,L.A. 1980
ESTIMATING MINE PILLAR STRENGTH FROM COMPRESSION TESTS
TRANSACTIONS OF THE AMERICAN INSTITUTE OF MINING, METALLURGICAL AND PETROLEUM ENGINEERS INCORPORATED, 268, PP. 1749-61
1B 2E ___ 4B 5B 6A 7E ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

114-PANEK,L.A.; MCCORMICK,J.A. 1973
ROOF/ROCK BOLTING
SME MINING ENGINEERING HANDBOOK, AIME, U.S. BUREAU OF MINES, DEPT. OF THE INTERIOR.
1B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ 14A ___

115-PANET,M. 1979
LES DEFORMATIONS DIFFEREES DANS LES OUVRAGES SOUTERRAINS
PROCEEDINGS OF THE 4TH CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY
OF ROCK MECHANICS, MONTREUX, SWITZERLAND, VOL.3, PP.291-301.
___ 2C ___ 4C ___ 6C 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

116-PARISEAU,W.G. 1974
INFLUENCE OF ROCK PROPERTIES VARIABILITY ON MINE OPENING
STABILITY ANALYSIS.
9TH CONF, ROCK MECH SYMP. PROC., MONTREAL, QUEBEC,
DEC 13-15, 1973, PP 141-165. ENERGY, MINES AND RESOURCES
CANADA, MINES BRANCH, OTTAWA, ONT., 1974.
1B 2C ___ 4B ___ ___ 7E ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

117-PARISEAU,W.G. 1975
LIMIT DESIGN OF MINE PILLARS UNDER UNCERTAINTY.
16TH. SYMP. ROCK MECH., UNIV. MINNESOTA, PP.287-301.
1B 2E 3D 4B 5B ___ 7E ___ 9B ___ ___ ___ 13B ___ ___

118-PARISEAU,WILLIAM.G. 1981
INEXPENSIVE BUT TECHNICALLY SOUND MINE PILLAR DESIGN ANALY-
SIS.
INT J NUMBER ANAL METHODS GEOMECH VOL.5, NO.4, PP.429-447.
1B 2C ___ ___ 5B ___ 7E ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

119-PARK,D.W. 1980
MODEL STUDIES OF SUBSIDENCE OVER ROOM AND PILLAR COAL MINES
USING HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY.
PROC. SYMP. ROCK MECH. 21ST ROCK MECH: A STATE OF THE ART,
UNIV. OF MO. ROLLA, MAY 28-30, 1980, PP. 265-74.
1B 2E ___ ___ 5A 6C ___ ___ ___ ___ ___ ___ 13C ___ ___

120-PARKER,J. 1973
HOW CONVERGENCE MEASUREMENTS CAN SAVE MONEY.
ENG MIN J., PP.92-97.
1B 2D ___ 4B ___ 6A 7A ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

121-PARKER,J. 1973
HOW TO DESIGN BETTER MINE OPENINGS.
ENG MIN J, VOL.174, NO.12, PP.76-80.
1B 2D ___ 4B ___ 6C 7A ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

122-PARKER,J. 1973
PART 4, PRACTICAL ROCK MECHANICS FOR THE MINER; THE RELATION -SHIP BETWEEN STRUCTURE, STRESS AND MOISTURE
ENG MIN J. VOL.174, NO.10, PP.91-95.
1B 2D ___ ___ ___ 6C 7A ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

123-PARKER,J. 1973
PRACTICAL ROCK MECHANICS FOR MINERS.
ENG MIN J., JUNE 1973., PP.104-109.
1B 2D ___ ___ ___ ___ 7C ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

124-PARKER,J. 1973
WHAT CAN BE LEARNED FROM SURFACE SUBSIDENCE
ENG MIN J., JULY 1973, PP.70-73.
1B 2D ___ 4A ___ ___ 7A ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

125-PARKER,J. 1974
HOW TO IMPROVE ROOF SUPPORT
ENG MIN J., VOL.175, NO.1, PP.90-95.
1B 2D ___ ___ ___ ___ 7A ___ ___ ___ ___ ___ ___ 14A ___

126-PARKER,J. 1974
LOGICAL WAY TO DESIGN PILLARS PART 7. PRACTICAL ROCK MECHANICS FOR THE MINER.
ENG MIN J, VOL.175, NO.2 PP.67-71.
1B 2E ___ 4B 5B 6C 7E ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

127-PARKER,J. 1983
PRACTICAL ROCK MECHANICS PILLAR DESIGN - PROBLEM OR OPPORTUNITIES
1ST INT. CONF. ON STABILITY IN UNDERGROUND MINING, VANCOUVER BC. CAN. AUG. 1982, C.O. BRAWNER EDITOR, AIME NEW YORK, PP.99-120.
1B 2A ___ 4B 5B ___ 7A ___ ___ ___ 11A ___ ___ ___ ___

128-PEKING COAL RESEARCH ESTABLISMENT 1976
STUDIES ON OVERBURDEN DESTRUCTION AND SAFE COAL MINING UNDER WATER BODIES.
9TH. WORLD MINING CONGRESS, WEST GERMANY, MAY 1976, II-13, PP. 1-7.
1I 2D 3C ___ ___ 6C 7F ___ ___ 10A ___ ___ ___ ___ ___

129-PENG,S.S. 1977
ROCK MECHANICS USED IN ROOF CONTROL
CIM BULLETIN, VOL.70, NO.780, PP.151-152.
1B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ 10A ___ ___ ___ ___ ___

130-PILLAR,C.L.; DRUMMOND,A.D. 1975
IMPORTANCE OF GEOLOGICAL DATA IN PLANNING UNDERGROUND ORE EXTRACTION
CIM BULLETIN, VOL.68, NO.754, PP.114-116.
1A 2E ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

131-POTHINI,B.R.; THALER,J.H.; FINLAY,W.L. 1976
ROCK MECHANICS CONSIDERATIONS IN MINE DESIGN FOR A DEEP-BEDDED DEPOSIT UNDER THE INFLUENCE OF RESIDUAL TECTORIC FORCES
MONOGRAPH ON ROCK MECHANICS APPLICATIONS IN MINING W.S. BROWN,S.J., GREEN,W.A. HUSTRULID, EDITORS. PROC. OF 17TH SYMPOSIUM OR ROCK MECHANICS, SNOWBIRD, UTAH, AUGUST 1976, PP.46-52.
1B 2E ___ ___ ___ 6A 7B ___ 9B ___ ___ 12A ___ ___ ___

132-POTTS,E.L.J. 1974
MINING SUBSIDENCE AND THE ENVIRONMENT.
INST. MNG METALL., LONDON, 1974, PP.661-687.
1D 2B 3A ___ ___ 6A 7A ___ 9B 10D 11A 12A ___ ___ ___

133-RIDDLE,J.M. 1980
DEALING WITH SUBSIDENCE AND SMCRA (SURFACE MINING CONTROL AND RECLAMATION ACT)
MINING ENGINEERING, VOL.32, NO.12, PP.1702-1764.
1B ___ ___ ___ ___ ___ ___ 8C ___ 10A ___ ___ ___ ___ ___

134-ROESNER,E.K.; POPPEN,S.A.G.; KONOPKA,J.C. 1983
STABILITY DURING SHAFT SINKING.
1ST INT. CONF. ON STABILITY IN UNDERGROUND MINING, VANCOUVER, BC. CANADA, AUG. 1982, C.O. BRAWNER EDITOR, NEW YORK, PP.749-769, 1983.
1A 2C ___ 4C ___ ___ 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

135-SALAMON,M.D.G. 1970
STABILITY, INSTABILITY AND DESIGN OF PILLAR WORKINGS
INT J ROCK MECH MINING SCI, VOL.7, NO.6, PP.613-631.
1F 2C 3D 4B ___ ___ 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

136-SALAS,J.A.J. 1979
DEUX CAS DE SUBSIDENCE EN ESPAGNE
PROCEEDINGS OF THE 4TH CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, MONTREUX, SWITZERLAND, VOL.3, PP.375-382.
1C 2B 3D 4B ___ 6A ___ ___ 9B 10D ___ ___ ___ ___ ___

137-SANDY,J.D.; PIESOLD,D.D.A.; FLEISCHER,V.D.; FORBES,P.J. 1977
FAILURE AND SUBSEQUENT STABILIZATION OF NO. 3 DUMP AT MUFULIRA MINE, ZAMBIA.
I.M.M. TRANS.A, JULY, PP.114-122.
1E 2B 3A 4A ___ ___ 7B ___ 9C 10C ___ ___ ___ ___ ___

138-SANDY,J.D.; PIESOLD,D.D.A.; FLEISHCER,V.D.; FORBES,P.J. 1976
FAILURE AND SUBSEQUENT STABILIZATION OF NO. 3 DUMP AT MUFULIRA MINE, ZAMBIA.
I.M.M. TRANS.A, OCT. VOL.85, PP.144-162.
1E 2B 3E 4A ___ ___ 7A ___ 9C 10C ___ ___ ___ ___ ___

139-SCHMUCK,C.H. 1979
CABLE BOLTING AT THE HOMESTAKE GOLD MINE.
MIN ENG (NY), DEC, PP.1677-1681.
1B 2D ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ 10C ___ ___ ___ 14B ___

140-SCHWARTZ,A. 1978
PILLAR RECOVERIES USING CONSOLIDATED FILL AT NORANDA MINES LTD., MANITOUWADGE, ONTARIO.
MINING WITH BACKFILL; 12TH CANADIAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM, SUDBURY, ONT. CANADA, MAY 23-25, 1978. CAN INST MIN METALL., SPEC. VOL.19, PP.56-68.
1A 2B ___ ___ ___ ___ ___ ___ 9A 10A ___ 12B ___ ___ ___

141-SERATA,S. 1976
STRESS CONTROL TECHNIQUE - AN ALTERNATIVE TO ROOF BOLTING.
MNG ENG, VOL.28, NO.5, PP.51-56.
1B 2D ___ 4B ___ 6A 7F ___ ___ ___ ___ ___ ___ 14A ___

142-SHEOREY, P.R.; SINGH,B. 1983
APPLICATION OF A ROCK MASS CLASSIFICATION TO MINING STABILITY PROBLEMS - SOME CASE STUDIES.
1ST INT. CONF. ON STABILITY IN UNDERGROUND MINING,VANCOUVER, B.C. CANADA, AUG. 1982, C.O. BRAWNER EDITOR, A.I.M.E., NEW YORK, PP. 383-395.
1I 2A 3A 4B 5B ___ 7B ___ 9B 10A 11A 12A 13A ___ ___

143-SHEPHERD,J.; FISHER,N.I. 1978
FAULTS AND THEIR EFFECT ON COAL MINE ROOF FAILURE AND MINING RATE, A CASE STUDY IN A NEW SOUTH WALES COLLIERY.
MNG ENG, PP.1325-1334.
1F 2B ___ ___ ___ ___ 7A ___ ___ 10A ___ ___ ___ ___ ___

144-SHI,G.H.; GOODMAN,R.E. 1981
A NEW CONCEPT FOR SUPPORT OF UNDERGROUND AND SURFACE EXCAVATIONS IN DISCONTINUOUS ROCKS BASED ON A KEYSTONE PRINCIPLE.
PROC. OF THE 22ND U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS. ROCK MECHANICS FROM RESEARCH TO APPLICATION. PUBLISHED BY THE MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, JUNE 1981, CAMBRIDGE, MASS, U.S.A. PP. 310-316.
1B 2D ___ ___ ___ ___ 7B ___ ___ ___ ___ ___ 13C ___ ___

145-SINGH,K.H.; HEDLEY,D.G. 1980
REVIEW OF FILL TECHNOLOGY IN CANADA.
CANADA CENTRE FOR MINING AND MINERAL TECHNOLOGY, MINING RESEARCH LAB., REPORT MRP MRI 80-38, JAN. 1980, 35P, (REF 35).
1A ___ ___ ___ ___ 6D 7A ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

146-SINGH,R.D. 1979
SOME INVESTIGATIONS INTO THE SURFACE MOVEMENT DUE TO UNDERGROUND MINING BY ROOM AND PILLAR METHOD
PROCEEDINGS OF THE 4TH CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, MONTREUX, SWITZERLAND, 1979, VOL.1, PP.731-736.
1I 2D 3A ___ 5B 6A ___ ___ 9B 10A 11A 12A ___ ___ ___

147-SINHA,A.K. 1983
A CONTINUOUS MINE ROOF MONITOR.
1ST INT. CONF. ON STABILITY IN UNDERGROUND MINING, VANCOUVER, BC. CANADA, AUG. 1982, C.O. BRAWNER EDITOR, NEW YORK, PP.484-493.
1A 2D ___ ___ ___ 6C 7F ___ 9B 10A ___ ___ ___ 14A ___

148-SKELLY AND LOY 1976
GUIDELINES FOR MINING NEAR WATER BODIES PHASE 3, RECOMMENDED GUIDELINES FOR MINING UNDER SURFACE WATERS.
SKELLY AND LOY, PA., NTIS PB-264/728, 107 PAGES.
1B 2A 3E ___ 5A ___ 7A 8C 9B 10A ___ 12A ___ ___ ___

149-SMITH,J.D. 1967
MODIFYING MINE DESIGN FROM ROCK MECHANICS DATA.
PROC. OF 4TH CANADIAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM, OTTAWA, 253 PAGES.
1A ___ ___ ___ 5B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

150-SMITH,P. 1981
NATIONAL MINE SUBSIDENCE ENGINEERING RESEARCH PROGRAM.
DEPARTMENT OF ENERGY, WASHINGTON D.C., U.S., CONTRACT £ W-7405-ENG.36 BY LOS ALAMOS SCIENTIFIC LABORATORY.
DE81028592, LA-8907-MS
1B 2A 3D ___ ___ 6D 7E 8B ___ ___ ___ ___ 13D ___ ___

151-SOUTHEY,V.J. 1969
HISTORY AND PROBLEMS OF THE WABANA SUBMARINE IRON MINE
CIM BULLETIN, VOL.62, NO.684, PP.371-396.
1A 2B 3B ___ 5A ___ ___ ___ 9B 10C ___ 12A ___ ___ ___

152-ST-JOHN,C.M. ET AL 1979
EVALUATION OF MINE PARAMETERS FOR COPPER - NICKEL DEPOSITS OF NORTHERN MINNESOTA.
U.S. DEPT. OF COMMERCE, NATIONAL TECHNICAL INFORMATION SERVICE, PB 80 - 144074, FEB. 1979.
1B 2E ___ 4B 5B 6A 7C ___ 9D 10C ___ 12B ___ ___ ___

153-STEFENKO,R. 1973
SUBSIDENCE AND GROUND MOVEMENT
SME MINING ENGINEERING HANDBOOK, AIME, U.S. BUREAU OF MINES, DEPT. OF THE INTERIOR.
1B 2E 3A ___ ___ 6A 7E 8B 9B 10A ___ 12A ___ ___ ___

154-STOUT,K. 1973
THE LAW OF SUBSIDENCE AND SUPPORT AS APPLIED TO MINES
SME MINING ENGINEERING HANDBOOK, AIME, U.S. BUREAU OF MINES, DEPT. OF THE INTERIOR.
1B ___ ___ ___ ___ ___ ___ 8C ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

155-SUTHERLAND,H.J.; MUNSUN,D.E. 1982
COMPLEMENTARY INFLUENCE FUNCTIONS FOR PREDICTING SUBSIDENCE CAUSED BY MINING.
23TH U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, BERKELY, CALIF., U.S. A., AUG. 25, 1982, 7P. SPONSOR: DEPARTMENT OF ENERGY, WASHINGTON D.C.
1B 2E ___ ___ ___ 6A 7B ___ 9B 10A 11A 12A ___ ___ ___

156-THIAN,R.Y. 1980
GROUND CONTROL AT KIDD CREEK MINE
UNDERGROUND ROCK ENGINEERING; 13TH CANADIAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM, UNIV. TORONTO, MAY 28-29, 1980. SPECIAL VOLUME - CANADIAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY 22, PP.73-79.
1A 2B ___ ___ ___ 6A ___ ___ 9A 10C ___ ___ ___ ___ ___

157-THIANN,R.Y. 1983
ROCK MECHANICS TO KEEP A MINE PRODUCTIVE
CANADIAN MINING JOURNAL, APRIL, PP.61-66.
1A 2D ___ ___ ___ 6F 7F ___ 9A 10C ___ ___ ___ ___ ___

158-THOMAS,EG. 1975
A PROPOSED FILL RESEARCH PROGRAM FOR THE CANADIAN MINING INDUSTRY.
CANMET, M.R.L., REP/75-38, 18 PAGES.
1A ___ ___ ___ 5B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

159-TINCELIN,E. 1982
STABILITY OF SURFACES ABOVE UNDERGROUND MINING OPERATIONS IN METAL OR SIMILAR MINES ABANDONED PILLARS OR BLOCKS.
INDUSTRIE MINERALE, LES TECHNIQUES, NO.2, FEVRIER, PP.79-111
1C 2A 3E 4A 5A 6A 7B ___ 9B 10C ___ ___ 13C ___ ___

160-TINCELIN,E.; RIVELINE,C. 1965
ELEMENTS D'UNE POLITIQUE DES STOTS DE PROTECTION DANS LES MINES DE FER DE LORRAINE.
ANN MINES, FEB. 1965, PP.85-114.
1C 2A 3A 4B 5A ___ 7B 8B 9B 10C 11A 12A ___ ___ ___

161-TOUSEULL,J.; RICH,C. 1980
DOCUMENTATION AND ANALYSIS OF A MASSIVE ROCK FAILURE AT THE BAUTSCH MINE, GALENA, ILL.
US DEPT. OF INTERIOR, BUREAU OF MINES R.I. 8453, 49 PAGES.
1B 2B 3A 4A 5A ___ 7B ___ 9B 10C 11A 12A ___ ___ ___

162-TUBBY,J.E.; FARMER,I.W. 1981
STABILITY OF UNDERSEA WORKINGS AT LYNEMOUTH AND ELLINGTON COLLIERIES.
MIN. ENG. (LONDON), V. 141, N 239, AUG 1981, PP. 87-96
1D 2B 3B 4A 5A 6A 7F 8B 9B 10A 11A 12A ___ ___ ___

163-WADE,L.V.; CONROY,P.J. 1980
ROCK MECHANICS STUDY OF A LONGWALL PANEL
MINING ENGINEERING, VOL.32, NO.12, PP.1728-1734.
1B 2B ___ 4B 5B 6D 7E ___ 9B 10A ___ ___ ___ ___ ___

164-WALDECK,H.G. 1979
THE DESIGN AND SUPPORT OF LARGE UNDERGROUND CHAMBERS AT DEPTH IN GOLD MINES OF THE GOLD FIELDS GROUP OF SOUTH AFRICA
PROCEEDINGS OF THE 4TH CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, VOL.1, PP.565-570, MONTREUX, SWITZERLAND 1979.
1E 2E ___ 4B ___ ___ 7B ___ 9C 10C ___ ___ ___ ___ ___

165-WARDELL,K. 1967
DESIGN OF PARTIAL EXTRACTION SYSTEMS IN MINING.
PROC. OF 4TH CANADIAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM, OTTAWA
PP.271-296.
1D 2E ___ ___ 5B 6A 7B ___ 9B 10A ___ 12A ___ ___ __

166-WARDELL,K. 1976
GUIDELINES FOR MINING UNDER SURFACE WATER, PHASE 3, AND FINAL REPORT.
WARDELL AND PARTNERS, NTIS PB-264 729, 59 PAGES.
1B 2A 3E 4A 5A ___ 7B 8B 9B 10A 11A 12A ___ ___ ___

167-WEAKLY,L.A. 1973
A HISTORY OF ST. JOES EXPERIENCE WITH THE VALUE OF ROCK MECHANICS UTILIZATION.
SYMP. 15TH. ROCK MECH, SEPT 1973, SOUTH DAKOTA, PP.591-602.
1B 2B 3D ___ ___ 6A ___ ___ ___ 10C ___ ___ ___ ___ ___

168-WHITTAKER,B.N.; SOBLE,M.J. 1980
ROCK MECHANICS INSTRUMENTATION IN UNDERGROUND IRONSTONE MINING IN THE U.K.
UNDERGROUND ROCK ENGINEERING; 13TH CANADIAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM, UNIV. TORONTO, MAY 28-29, 1980. SPECIAL VOLUME - CANADIAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY 22, PP.111-116.
1C 2C ___ ___ ___ 6D ___ ___ 9B 10C ___ ___ ___ ___ ___

169-WILLIAMS,J.H. 1975
THE ROLE OF THE MISSOURI GEOLOGICAL SURVEY IN UNDERGROUND MINING AND SPACE UTILIZATION IN KANSAS CITY, MISSOURI.
PROCEEDINGS OF THE SYMPOSIUM ON THE DEVELOPMENT AND UTILIZATION OF UNDERGROUND SPACE, UNIVERSITY OF MISSOURI, KANSAS CITY, PP.43-50
1B 2D ___ ___ 5B ___ 7A ___ ___ ___ 11A ___ ___ ___ ___

170-WOROTNICKI,G ET AL 1980
EXPERIENCE WITH THE MONITORING OF CROWN PILLAR PERFORMANCE IN TWO AUSTRALIAN MINES
THIRD AUSTRALIAN - NEW ZEALAND CONFERENCE ON GEOMECHANICS; VOLUME 2, WELLINGTON, NEW ZEALAND, MAY 12-16, 1980. PROCEEDINGS OF TECHNICAL GROUPS - NEW ZEALAND INSTITUTION OF ENGINEERS, PP. 2-161 A 2-168.
1F 2B ___ ___ 5B 6F 7B ___ 9C 10C ___ 12B ___ 14B ___

171-WRIGHT,F.D. 1973
ROOF CONTROL THROUGH BEAM ACTION AND ARCHING.
SME MINING ENGINEERING HANDBOOK, AIME, U.S. BUREAU OF MINES, DEPT. OF THE INTERIOR.
1B 2C ___ 4B ___ ___ 7B ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

172-WYLLIE,R. 1979
HUNGARY MINES BAUXITE BELOW HEAVILY WATERED DOLOMITE.
WORLD MINING, MARCH 1979, PP.50-53.
___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___ ___

173-YU,Y.S.; TOEWS,N.A. 1976
THREE DIMENSIONAL STRESS DISTRIBUTION AROUND THE KIDD CREEK MINE UNDER A HIGH TECTONIC STRESS FIELD.
CANMET, M.R.L., REP. 76-162, 58 PAGES.
1A 2A 3E 4B ___ ___ 7C ___ 9A 10C ___ ___ ___ ___ ___

ANNEXE 3

VISITE DES MINES

TABLE DES MATIERES

PAGE

3.0 VISITE DES MINES 137

3.1 SELECTION DES MINES 137
3.2 RENCONTRE AVEC LA DIRECTION DES MINES 139
3.3 SYNTHESE DES VISITES DE MINES 140

3.3.1 Hydrogéologie 142
3.3.2 Conditions de surface 144
3.3.3 Modélisation, simulation 147
3.3.4 Mécanique des roches 149
3.3.5 Soutènement du/des pilier(s) de surface 151
3.3.6 Instrumentation, contrôle de la stabilité 153
3.3.7 Evaluation du massif rocheux 157

3.4 COMPTES-RENDUS DES VISITES DE MINES 160

Mine 1 161
Mine 2 190
Mine 3 217
Mine 4 238
Mine 5 262
Mine 6 280

3. VISITE DES MINES

3.1 SELECTION DES MINES

Le choix des sites miniers a été effectué par le comité consultatif. Les critères du choix étaient fondés sur les caractéristiques de propriétés minières fournissant un aperçu représentatif de la situation actuelle dans les mines souterraines. Dans le but de permettre au Comité de faire un choix judicieux, l'équipe de travail avait préparé neuf descriptions sommaires d'opérations minières dignes d'intérêt.

Chacune d'entre elles y était décrite en mettant l'emphase sur la géologie locale, la nature du ou des piliers de surface, les conditions de surface ainsi que sur les méthodes d'évaluation et de contrôle du terrain utilisées.

Cinq mines du Québec ont été choisies par le comité consultatif et une mine de l'Ontario sur l'avis de représentants du groupe CANMET. Le comité a décidé, pour des raisons de confidentialité, que les noms et les coordonnées des mines choisies ne doivent en aucune façon figurer dans le présent rapport. A défaut de noms, des numéros désignent les mines visitées décrites dans l'annexe 3 (mines nos 1 à 6). Chaque histoire de cas est détaillée selon un plan descriptif commun représenté au tableau 3.1.

TABLEAU 3.1: PLAN DESCRIPTIF COMMUN DES MINES VISITEES

1.0 TYPE DE GISEMENT - METHODE DE MINAGE

- 1.1 BREF HISTORIQUE DE LA MINE
- 1.2 METHODE DE MINAGE
- 1.3 TERMINOLOGIE UTILISEE
- 1.4 ELEMENTS DE CONCEPTION DU/DES PILIERS DE SURFACE
  - 1.4.1 Etude des conditions d'eau
  - 1.4.2 Sols au-dessus de la zone minéralisée
  - 1.4.3 Modélisation de la mine
  - 1.4.4 Mécanique des roches
  - 1.4.5 Soutènement
  - 1.4.6 Instrumentation / modes de contrôle
  - 1.4.7 Géométrie des piliers de surface
  - 1.4.8 Evaluation du massif rocheux
  - 1.4.9 Divers
- 1.5 BILAN DE LA VISITE

Selon les mines choisies, certains éléments sont plus détaillés que d'autres, dû à l'importance que les directions leur accordent et au volume de documentation disponible à chaque mine. Naturellement, les critères de conception et les moyens de contrôle de la stabilité des piliers de surface furent les principaux aspects sur lesquels les représentants du Groupe Roche portèrent leur attention.

3.2 RENCONTRE AVEC LA DIRECTION DES MINES

Le personnel-clé de chaque mine a été rencontré pour connaître l'approche utilisée dans la conception des piliers de surface. Parmi les gens rencontrés, on distingue le gérant général ainsi que les ingénieurs et géologues responsables des travaux souterrains. Au cours des rencontres, les sujets abordés étaient ceux résumés dans un questionnaire de visite destiné à orienter la discussion. Ce questionnaire s'intéressait entre autre à la perception de la direction face au problème de la stabilité en général, aux critères et contraintes utilisés dans la conception des piliers de surface et aux divers travaux exécutés "in situ" ainsi qu'en laboratoire. La visite des mines a également permis aux responsables d'exprimer leurs idées personnelles sur le sujet étudié.

Chaque visite de mine s'étendait généralement sur deux jours, le temps d'effectuer les rencontres, discussions et de visiter les endroits pertinents de la mine souterraine.

3.3 SYNTHESE DES VISITES DE MINES

Pour plus de clarté, nous représentons ici le tableau 4.1, tiré du texte principal. Il résume l'ensemble des travaux réalisés à chacun des sites visités. Dans ce chapitre, les sept (7) groupes de travaux seront discutés séparément afin de faire ressortir les éléments les plus positifs de chacune de ces catégories. Comme pour le tableau 4.1, nous avons utilisé la pondération suivante:

- ○ **Travaux peu élaborés**
- ◑ **Moyennement élaborés**
- ● **Très détaillés**
- ▬ **Aucun travail / Ne s'applique pas**

TABLEAU 4.1 RÉSUMÉ DES TRAVAUX TOUCHANT LES PILIERS DE SURFACE

TRAVAUX	MINE NUMERO 1	2	3	4	5	6
HYDROGEOLOGIE						
. Evaluation visuelle	○	–	–	–	○	○
. Analyse spécifique	–	◑	◑	●	–	–
CONDITIONS DE SURFACE						
. Enlèvement du sol	–	–	◑	–	–	–
. Drainage	–	◑	◑	●	–	–
. Trous de forage	–	◑	◑	●	–	○
. Analyse de laboratoire	◑	◑	○	●	–	–
. Mise en plan	○	◑	◑	●	○	○
. Méthode sismique	–	–	–	○	–	◑
MODELISATION, SIMULATION						
. Modèle numérique	–	–	◑	◑	–	◑
. Simulation	–	–	–	–	–	–
MECANIQUE DES ROCHES						
. Programme interne	◑	◑	◑	●	◑	◑
. Etudes extérieures	–	○	◑	○	–	◑
. Essais en laboratoire	–	–	○	○	–	–
SOUTENEMENT DU/DES PILIER(S) DE SURFACE						
. Boulons conventionnels	–	◑	◑	–	◑	◑
. Tiges cannelées et cimentées	–	◑	●	–	–	–
. Tiges d'acier et résine	–	–	–	–	–	●
. Remblai en vrac	–	–	–	–	–	–
. Remblai hydraulique	–	●	–	–	–	–
. Remblai consolidé	–	–	◑	–	–	●
. Câbles cimentés	–	–	–	–	–	●
. Injection de ciment seul	–	◑	–	–	–	–
INSTRUMENTATION, CONTROLE DE LA STABILITE						
. Mesure des déplacements	○	–	–	●	–	●
. Mesure des contraintes "in situ"	–	–	–	–	–	○
. Inspection visuelle classique	○	◑	○	○	○	○
. Inspection systématique	◑	●	●	–	–	–
EVALUATION DU MASSIF ROCHEUX						
. Classification intégrée	●	○	○	◑	–	○
. Type de roche	–	◑	–	–	–	–
. Structure	–	–	○	◑	◑	○
. R.Q.D.	–	–	○	–	◑	●

Nous avons établi une pondération relative des travaux effectués à chaque mine, sans juger si ceux-ci étaient adéquats ou non, essentiels ou superflus pour l'étude d'un pilier de surface.

○ Travaux peu élaborés
◑ Moyennement élaborés
● Très détaillés
– Aucun travail / Ne s'applique pas

3.3.1 HYDROGEOLOGIE

TRAVAUX	MINES No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6
Evaluation visuelle	○	-	-	-	○	○
Analyse spécifique	-	◑	◑	●	-	-

Dans trois des six mines visitées, l'eau ne pose aucun problème majeur. Une simple inspection visuelle des chantiers est suffisante pour permettre d'apprécier ce facteur. Dans ces cas, une installation de pompage classique combinée à un réseau de drains sont suffisants pour contrôler les eaux souterraines. Les réseaux de fractures préviennent toute accumulation de pression d'eau importante. Les compagnies n'ont donc pas fait d'investigation plus poussée dans ce domaine.

Dans les cas No 2 et No 3 où l'on constate la présence de volumes d'eau évacués de l'ordre de 80 à 100 l/sec (1,050 à 1,320 gpm), les opérateurs ont cherché à déterminer le niveau de la nappe phréatique et les conditions du terrain de surface favorisant ou retardant l'écoulement de l'eau. Ces analyses avaient pour but d'ajuster le réseau de pompage souterrain aux conditions du site.

Seule la compagnie No 4, après avoir reconnu que la présence d'eau posait un sérieux problème d'opération et de stabilité (initialement jusqu'à 108 l/sec d'eau évacuée), a poursuivi l'analyse de l'hydrogéologie jusque dans les moindres détails. Son but était de modifier les conditions existantes ou comme il est mentionné dans l'une des études, de "dépressuriser et de désaturer" les 40 mètres de mort-terrain et le massif supérieur de la mine. Le niveau de la nappe phréatique devait ainsi être rabattu jusqu'à l'élévation -180 m. Pour ce faire, la direction de la mine a déterminé les caractéristiques précises de ce terrain, installé un réseau complexe de drainage, simulé l'écoulement de l'eau dans cette zone, procédé à un contrôle stricte de l'évolution des conditions en fonction du régime de pompage, etc...

3.3.2 CONDITIONS DE SURFACE

TRAVAUX	MINES No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6
Enlèvement du sol	-	-	◑	-	-	-
Drainage	-	◑	◑	●	-	-
Trous de forage	-	◑	◑	●	-	○
Analyse de laboratoire	◑	◑	○	●	-	-
Mise en plans	○	◑	◑	●	○	○
Méthode sismique	-	-	-	○	-	◑

Ce tableau donne un aperçu des travaux effectués par les compagnies minières pour délimiter et évaluer le mort-terrain situé au-dessus des chantiers supérieurs.

La solution radicale consistant à enlever le mort-terrain au-dessus des chantiers appelés à être minés jusqu'en surface, n'a été rencontrée qu'à une seule mine, et pour un petit nombre de chantiers seulement. Nous savons par contre que la méthode est utilisée ailleurs au Québec. Dans le cas étudié, il s'agissait d'une décision d'ordre économique basée sur les revenus anticipés d'une telle opération. Si les autres compagnies ne l'ont pas fait, c'est que dans trois cas, le volume de terrain était trop volumineux pour rentabiliser l'opération; les deux autres ne pouvaient le faire à cause de la présence d'un lac au-dessus de leurs chantiers.

Le drainage des chantiers est habituellement une opération routinière dans les mines. Il se produit souvent de façon naturelle, i.e. que les systèmes de joints sont suffisamment développés pour éviter la formation de fortes pressions d'eau à l'intérieur du massif et en permettre l'écoulement. Les opérateurs n'ont qu'à canaliser cette eau vers les bassins de décantation et les stations de pompage. Dans le cas présent, trois mines ont agi "positivement" afin d'accentuer le drainage du terrain de surface. Le cas No 4 est particulièrement intéressant puisque divers moyens ont été mis en commun afin d'abaisser le niveau de saturation du mort-terrain.

Les sondages effectués à partir de la surface font partie du moyen le plus répandu pour évaluer l'épaisseur du sol de recouvrement et par la même occasion, le profil du socle rocheux sous-jacent. Ils sont utilisés presque partout. Souvent, il ne s'agit que des sondages initiaux d'exploration destinés à découvrir ou délimiter la minéralisation. Dans les cas No 3 et No 4 cependant, des programmes spéciaux de forage ont été défrayés dans le but d'augmenter la précision des estimés initiaux. Ces programmes sont souvent nécessaires sachant que les forages d'exploration sont rares dans les niveaux supérieurs des mines.

Une constance se dégage parmi les mines qui effectuent ce que l'on pourrait appeler du forage de définition de l'épaisseur du mort-terrain: elles prélèvent des échantillons et font faire les analyses requises à l'identification des propriétés

géotechniques des différentes couches de sol traversées. Ces données servent alors soit à l'élaboration d'un programme de drainage, soit à permettre d'évaluer l'effet d'une rupture accidentelle du pilier de surface, comme ce fut le cas à la mine No 4.

La représentation sur plans du profil de la surface, sur les coupes longitudinales et les sections transversales, est toujours disponible. Par contre, le profil du socle rocheux est généralement moins bien défini et cela à cause des motifs expliqués plus haut. Nous revenons sur le fait qu'il n'est peut-être pas nécessaire dans tous les cas (si le gisement arrête à 50 ou 100 mètres de la surface par exemple) de localiser avec précision ce contact. Nous constatons simplement le fait qu'il est toujours difficile, à moins d'avoir l'intention de le faire, de bien localiser le profil du socle rocheux et par conséquent, de le montrer clairement sur tous les plans miniers.

Le méthode sismique n'a été utilisée que dans un cas alors qu'il était nécessaire de déterminer l'épaisseur du mort-terrain sous cinq mètres d'eau.

3.3.3 MODELISATION, SIMULATION

TRAVAUX	MINES No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6
Modèle numérique	-	-	◑	◑	-	◑
Simulation	-	-	-	-	-	-

Parmi le groupe de mines, trois ont utilisé des modèles numériques afin d'évaluer la stabilité générale de leur opération. Dans deux cas seulement, cette technique a été appliquée aux piliers de surface.

A toutes les mines visitées, nous avons fait face à beaucoup de réticence de la part des opérateurs quant au contenu de ces études et à l'utilisation qu'ils en font. Notre opinion à ce sujet est la suivante:

1- compte tenu que l'application de ces modèles d'analyse utilisant des méthodes de calculs par éléments finis est relativement récente dans le domaine des mines souterraines du Québec,

2- tenant compte du fait qu'il s'agit d'une analyse faite à un moment précis de la vie de la mine, dans des conditions fixes, pouvant se modifier rapidement,

3- considérant le fait que les "inputs" ou données de base utilisées dans le modèle sont relativement peu nombreuses,

4- que les résultats de telles analyses sont généraux et la plupart du temps, sujets à interprétation,

il est normal que les mines hésitent à publier ces informations. Comme les opérateurs considèrent qu'il s'agit là d'un outil (parmi plusieurs) de décision, ils craignent que cette façon de voir ne soit faussée à un point tel que les résultats des modèles soient perçus comme reflétant la seule réalité possible. Pourtant, il ne devrait, à notre avis, n'y avoir aucune gêne à démontrer l'intérêt que nous manifestons à vouloir décrire le plus précisément possible une réalité aussi complexe qu'un massif rocheux.

Quoiqu'il en soit, nous avons recueilli quelques bribes d'informations sur ce sujet, principalement dans les cas No 3 et No 4. A la suite de notre visite sur ces sites, il est effectivement clair dans notre esprit que les résultats tirés de tels modèles ne peuvent pas être et ne sont pas les seuls éléments de conception des piliers de surface.

3.3.4 MECANIQUE DES ROCHES

TRAVAUX	MINES					
	No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6
Programme interne	◑	◑	◑	●	◑	◑
Etudes extérieures	-	○	◑	○	-	◑
Essais en laboratoire	-	-	○	○	-	-

Nous avons pu déceler une volonté certaine de la part de toutes les mines de maintenir actif un département de mécanique des roches. L'idée d'assigner la responsabilité de ce domaine à une ou des personnes compétentes en la matière est généralement bien acceptée. Toutes les opérations ne consacrent probablement pas des sommes fabuleuses à cette activité mais toutes soutiennent un minimum de travaux.

Dans la plupart des cas, les groupes de mécanique des roches travaillent en collaboration avec les départements de géologie et de production. Leur rôle est souvent de recueillir des informations sur les caractéristiques du massif rocheux, les diverses méthodes de support requises et d'intervenir au niveau de la méthode de minage utilisée. Ce groupe fait généralement appel aux laboratoires extérieurs afin d'obtenir les caractéristiques ou propriétés physiques des roches qu'il veut étudier.

Dans les cas les plus complexes, lorsque des outils mathématiques puissants sont nécessaires, les dirigeants ont recours aux services de firmes ou de consultants spécialisés dans ce domaine. Aux mines No 3, No 4 et No 6, l'évaluation de la stabilité et les recommandations de conception des piliers de surface ont été produites par des gens de l'extérieur.

3.3.5 SOUTENEMENT DU/DES PILIERS DE SURFACE

TRAVAUX	MINES NUMERO 1	2	3	4	5	6
Boulons conventionnels	-	◑	◑	-	◑	◑
Tiges cannelées et cimentées	-	◑	●	-	-	-
Tiges d'acier et résine	-	-	-	-	-	●
Remblai en vrac	-	-	-	-	-	-
Remblai hydraulique	-	●	-	-	-	-
Remblai consolidé	-	-	◑	-	-	●
Câbles cimentés	-	-	-	-	-	●
Injection de ciment seul	-	◑	-	-	-	-

Nous pourrions élaborer longtemps sur les méthodes de soutènement utilisées dans ces mines. Toutes manifestent beaucoup d'intérêt pour cet aspect du minage. Si, par contre, nous nous limitons au niveau des piliers de surface, les pratiques sont plus restrictives.

Dans les vieux chantiers, il est fréquent de retrouver des boulons conventionnels au toit et sur les murs des chantiers. Aux mines No 2 et No 3, plusieurs anciens piliers de surface ont dû être boulonnés à nouveau, à cause d'un début de détérioration cette fois, en utilisant des tiges cannelées cimentées en place. Cette pratique sera probablement standardisée dans l'avenir car ce type de boulons ne nécessite aucun en-

tretien. Le soutènement de ces piliers est également assuré par le remblayage des chantiers sous-jacents, ce qui tend à restreindre ces déformations. La mine No 6 utilise une combinaison de tiges cannelées et résine, de câbles d'acier et ciment et de remblai consolidé, afin de stabiliser son éponte supérieure composant le pilier de surface.

Il est difficile d'apprécier si le support utilisé dans ces mines est sur ou sous-évalué. Un fait demeure, les opérateurs sont conscients de l'importance d'assurer la stabilité à long terme des piliers de surface.

3.3.6 INSTRUMENTATION, CONTROLE DE LA STABILITE

TRAVAUX	MINES NUMERO 1	2	3	4	5	6
Mesure des déplacements	○	-	-	●	-	●
Mesure des contraintes "in situ"	-	-	-	-	-	○
Inspection visuelle classique	○	◑	○	○	○	○
Inspection systématique	◑	●	●	-	-	-

Le but de l'utilisation d'instruments de mesure est de vérifier le comportement du massif tel qu'il se présente dans la réalité. C'est donc soit un moyen de connaissance, soit une façon de confirmer les hypothèses du "design".

Les mines No 4 et No 6 utilisent des extensomètres à tiges afin de déceler le déplacement du massif au niveau du pilier de surface. Dans le cas de ces mines, le but de cette pratique est de cumuler des données sur le comportement du terrain au fur et à mesure que les travaux progressent vers le haut du gisement. En effet, leur pilier de surface n'est pas encore réellement établi. Les deux mines travaillent présentement à concevoir la forme finale (lire épaisseur) de ces piliers. L'instrumentation a été ainsi mise en place afin de fournir une banque de données susceptibles d'influencer les paramètres de conception du pilier, si les résultats obtenus ne correspondent pas aux prévisions ini-

tiales. L'importance de l'utilisation de ce type d'équipement est ouvertement reconnue par les responsables de ces deux opérations.

Aucune mesure de la valeur des contraintes naturelles n'a été effectuée par le personnel des mines visitées. Dans le cas No 6, nous savons que l'équipe extérieure qui a produit une analyse de la stabilité générale de la mine à l'aide d'un modèle numérique, a effectué quelques mesures de ce type. Les résultats qui ont été obtenus par l'utilisation de la méthode nommée "overcoring" démontrent une variation significative du rapport entre la contrainte horizontale sur la contrainte verticale, nommée K_o, selon les (2) axes principaux du gisement. Ainsi, dans la partie supérieure du gisement, K_o est approximativement égal à 3,5 dans la direction de l'axe longitudinal alors qu'il se situe entre 1,0 et 2,0 selon l'axe transversal. Nous avons voulu souligner ce fait afin de mettre en évidence la nécessité de bien apprécier ce facteur avant de procéder à toute conception assistée par ordinateur; ce qu'effectivement a fait la mine No 6. La propriété No 4 a pour sa part utilisé des valeurs moyennes de K_o, compilées à d'autres mines situées dans des formations similaires. Elle se propose cependant de faire quelques essais de ce genre au niveau de son propre massif.

Toutes les mines comptent beaucoup sur l'appréciation de leur personnel quant à l'évaluation de la stabilité. L'on nous a rapporté que tous les employés au travail sous terre sont en mesure de détecter les signes d'instabilité et d'évaluer d'une façon générale la compétence du terrain. L'inspection

des chantiers dépend dans ces cas de tous les niveaux de supervision, du contremaître de quart au gérant de la mine, en passant par le ou les ingénieurs en mécanique des roches. C'est là à n'en point douter une très bonne pratique qui mérite cependant une plus grande attention. Il est en effet toujours possible qu'un secteur de la mine soit négligé, que l'information "se perde en route". Nous avons recueilli des précisions sur deux pratiques déjà établies dans le but de pallier à cette lacune.

La mine No 2 a en effet intégré au rapport journalier des contremaîtres une section spéciale destinée à permettre l'évaluation continuelle des ouvertures. Dans cette section intitulée "STABILITE DU ROC", le responsable peut évaluer la condition du roc sur une échelle de 1 à 6, indiquer s'il y a chute de roc, présence excessive d'eau, etc... Cette première pratique s'applique à l'ensemble de la mine.

Au niveau du ou des piliers de surface, les opérations No 2 et No 3 ont établi des standards précis d'inspection. Les règles sont fixées à l'avance, les responsables du programme sont identifiés, la fréquence des inspections est définie, une carte indique clairement les points qui doivent être vérifiés et un régistre sert à consigner l'information recueillie ainsi que les correctifs apportés, si besoin. Cette procédure vraiment systématique nous semble excellente et digne de mention. A la mine No 1, une procédure similaire est utilisée pour l'ensemble des chantiers.

Il peut être utile de noter que l'instauration de ces tournées d'inspection "organisées" ne date que de quelques années (1980-81). Par contre, les personnes interrogées sur ce sujet avouent en apprécier de plus en plus l'utilité.

3.3.7 EVALUATION DU MASSIF ROCHEUX

TRAVAUX	MINES No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6
Classification intégrée	●	○	○	◑	-	○
Type de roche seul	-	◑	-	-	-	-
Structure	-	-	○	◑	◑	○
RQD Seulement	-	-	○	-	◑	●

Ce tableau fait référence à la notion de "connaissance" du massif rocheux à l'intérieur duquel les infrastructures sont développées. C'est à notre avis la première étape de tout travail sérieux. Parmi les diverses façons d'apprécier la qualité de la roche, les méthodes de classification intégrées sont celles qui ont pour objectif de combiner en un tout cohérent le maximum de paramètres susceptibles de contribuer à la description réaliste du massif. Depuis Terzaghi en 1946 jusqu'à Laubscher et Taylor en 1977, en passant par Deere en 1964, pour ne nommer que les plus connus, tous les auteurs avaient un but commun, soit: définir le massif rocheux en éliminant le plus possible les appréciations subjectives. Afin d'illustrer l'évolution de ces méthodes de classification, nous avons extrait un tableau (voir tableau 3.1 du texte principal) d'une thèse de maîtrise écrite par P. Legast (1981). Ce tableau démontre clairement que les classifications les plus récentes accordent une place prépondérante au rôle que jouent les discontinuités dans la stabilité d'un

massif rocheux. De cette appréciation découlera toute une série de recommandations pratiques telles que: la capacité d'auto-support du roc considéré, des recommandations de support, etc.

Une seule des mines visitées utilise d'une manière systématique une méthode de classification intégrée. Elle emploie la méthode de Laubscher, variante adaptée aux mines, de celle de Bieniawski du CSIR (South African Council for Scientific and Industrial Research), produite originalement pour les travaux de creusage des tunnels. La propriété No 4 a utilisé partiellement cette méthode en parallèle avec celle du N.G.I. (Norwegian Geotechnical Institute) de Barton et al. pour évaluer son pilier de surface. Aux mines No 2, No 3 et No 6, les deux méthodes ont été timidement employées dans des secteurs restreints, généralement pour servir de base à l'élaboration de modèles numériques.

Le cas de la mine No 2 est intéressant puisque depuis de nombreuses années, cette compagnie, à travers le département de géologie, avait déjà reconnu neuf catégories de roche à l'intérieur de la propriété. Les opérateurs étaient habitués à retrouver sur les plans géologiques une évaluation pondérée du massif. Cette évaluation n'était pas produite d'une façon aussi stricte que celle des méthodes décrites plus haut, mais avait comme résultat pratique de fournir à la direction de la mine un guide cohérent sur la qualité du massif. Elle n'a qu'un seul défaut: elle dépend trop de la subjectivité (ou de l'expérience) des individus qui allouent le pointage au massif. Nous avons en effet compris que les géologues de

cette mine évaluent les sondages d'exploration sur la base du type de roche rencontré. Il s'agit par exemple d'une séricite massive d'où un type 3-4, d'une séricite altérée d'où un type 5-6 ou encore, d'une métha-anorthosite d'où un type 0-1. Chacun de ces types se comporte différemment et requiert une attention spéciale. Les opérateurs ont donc là un outil de travail utile afin d'apprécier à l'avance les conditions du terrain dans lequel ils auront à établir de nouveaux chantiers ou galeries.

La direction de la mine No 2 recueille des informations sur les structures géologiques majeures et les consignent sur plans. Cette procédure est bien établie et utilisée depuis le début de chaque opération. Ce rôle est confié au département de géologie. Nous avons cependant constaté que l'information au niveau du pilier de surface est de façon générale plus rare qu'ailleurs dans la mine. Ceci s'explique bien par le fait que tous recherchent avant tout à identifier du minerai. Il n'en demeure pas moins vrai qu'il est nécessaire de bien connaître le massif qui doit constituer le pilier de surface.

Finalement, la mine No 6 en particulier a reconnu l'importance du rôle des discontinuités vis-à-vis la stabilité des excavations. Pour cette opération, il est avantageux de déterminer le R.Q.D. (Rock Quality Designation) à partir de "tous" les sondages réalisés sur le site; ce qu'elle fait depuis plus de 5 ans. Il nous a été mentionné par exemple que le choix de la localisation d'une chambre pour concasseur a été arrêté à un secteur affichant une haute valeur de R.Q.D., donc susceptible d'être compétent. Dans plusieurs cas, la détermination du R.Q.D. peut être suffisamment précise pour les besoins de l'opération.

3.4 COMPTES-RENDUS DES VISITES DE MINES

Tel que mentionné au début de cette annexe, les comptes-rendus sont détaillés selon un plan descriptif commun. Etant donné la quantité appréciable d'informations recueillies à chaque mine visitée, l'on retrouvera au début de chaque compte-rendu une table des matières.

MINE NO 1

MINE D'AMIANTE: FOUDROYAGE EN BLOCS

TABLE DES MATIERES

PAGE

1.0 MINE D'AMIANTE: FOUDROYAGE EN BLOCS 163

1.1 BREF HISTORIQUE DE LA MINE 163
1.2 METHODE DE MINAGE 164
1.3 TERMINOLOGIE UTILISÉE 166
1.4 ELEMENTS DE CONCEPTION DU/DES PILIERS DE SURFACE 167

1.4.1 Etude des conditions d'eau 170
1.4.2 Sols au-dessus de la zone minéralisée 170
1.4.3 Modélisation de la mine 171
1.4.4 Mécanique des roches 171
1.4.5 Soutènement 173
1.4.6 Instrumentation/modes de contrôle 176
1.4.7 Géométrie des piliers de surface 177
1.4.8 Evaluation du massif rocheux 177
1.4.9 Divers 188

1.5 BILAN DE LA VISITE 188

MINE NO 1

1.0 MINE D'AMIANTE: FOUDROYAGE EN BLOCS

1.1 BREF HISTORIQUE DE LA MINE

Dès 1878, les premières tonnes de minerai ont été extraites d'un puits à ciel ouvert. Au début, environ 330 000 tonnes métriques étaient minées annuellement. Le fond a atteint la cote de + 214,0 m (référence: niveau de la mer) et c'est depuis 1951 que la mine opère en souterrain. Le premier niveau a été établi à + 114 m et est actuellement épuisé. Depuis 1978, le second niveau situé à l'élévation + 1 m, produit annuellement 1 100 000 tm de minerai.

Deux (2) compagnies sont propriétaires chacunes d'une partie du gisement. Celle que nous avons visitée exploite une section d'environ 282 m X 165 m dont le pendage varie de 35° à 70°.

Nous pouvons considérer qu'il s'agit d'un gisement de type massif dont le contact nord-ouest entre le minerai et le stérile est délimité par une zone de cisaillement majeure de 10 à 12 m d'épaisseur. Le contact opposé ne se retrouve que sur la propriété voisine.

La roche "mère" est composée de péridotite partiellement serpentinisée. Le massif rocheux est très fracturé et de compétence variable. La minéralisation se retrouve disséminée à travers ce réseau complexe de joints.

1.2 METHODE DE MINAGE

La méthode de foudroyage en blocs est utilisée à la mine visitée. Précisons tout de suite qu'il n'existe plus de pilier de surface à cette mine; le foudroyage en blocs a depuis longtemps détruit celui-ci. L'intérêt de cette opération pour notre étude repose sur la méthode qui y est utilisée pour évaluer et modifier les conditions naturelles de stabilité du massif rocheux.

De façon simplifiée, nous avons illustré à la figure 1.1 la séquence des opérations de cette mine souterraine. La première étape consistait à induire le foudroyage de la zone comprise entre l'élévation + 113,7 m et le fond de l'ancien puit situé à + 214,0 m. Il s'agissait bien sûr de détruire ce que nous avons défini comme un "pilier de surface", celui-ci avait une épaisseur minimale d'environ 100 m. Cette zone est nommée "1er niveau". Par la suite, un second niveau de production a été préparé afin d'extraire par foudroyage en blocs, la zone comprise entre l'élévation + 1 m et + 113,7 m, identifiée comme étant le "2ème niveau". La méthode permet ainsi de progresser vers le bas du gisement par tranches d'environ 100 mètres.

Cette opération utilise depuis environ 4 années la méthode dite par "LHD" (LOAD-HAUL-DUMP) dans laquelle le minerai est récupéré à l'aide de chargeurs sur roues ayant accès aux points de soutirage des niveaux d'extraction; le nombre de points de soutirage étant contrôlé par le volume du minerai situé au-dessus de sa zone d'influence et la valeur de la

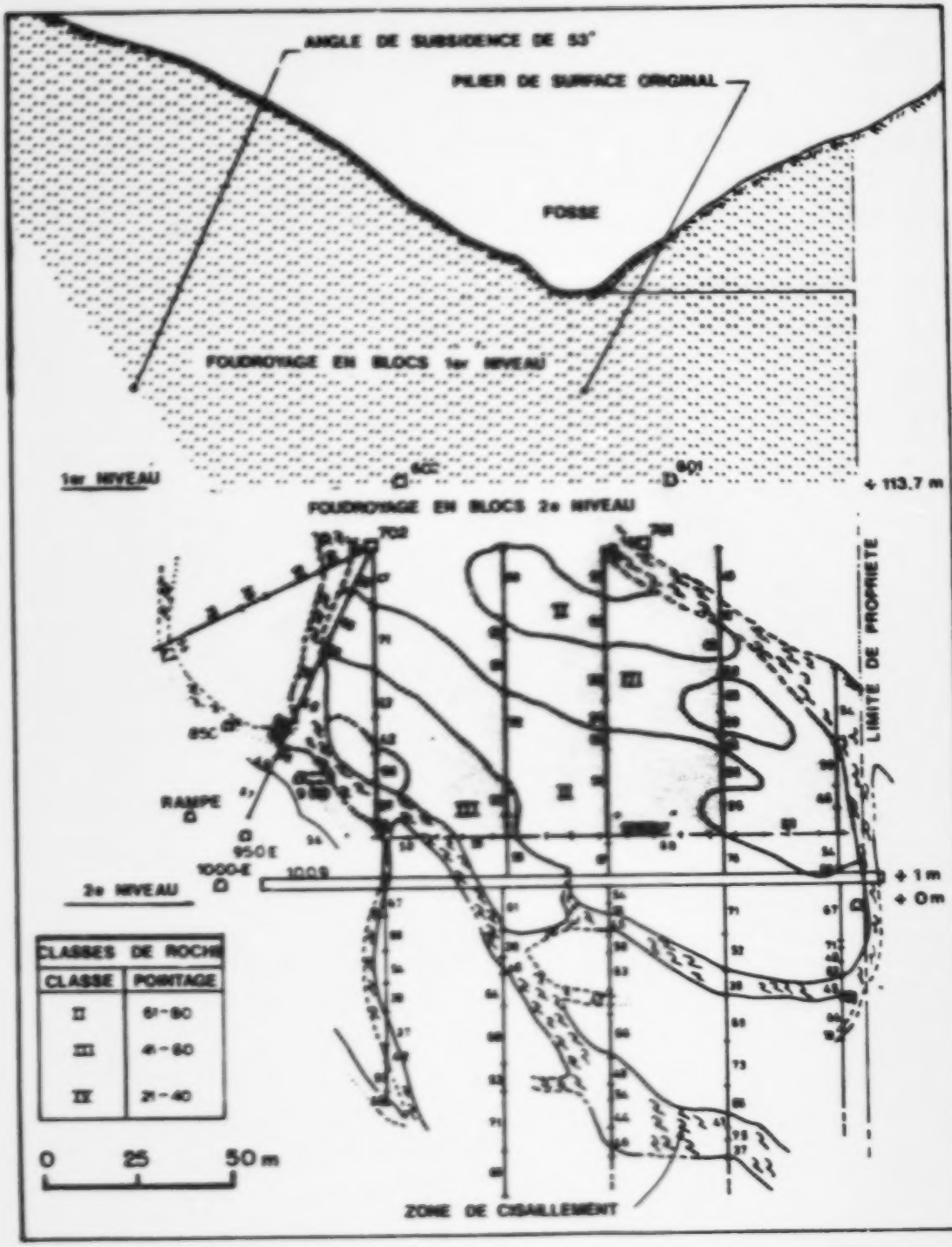


FIG. 1.1 METHODE DE MINAGE

production totale requise. Il se dégage de ceci deux aspects importants. Le premier est de déterminer quelles sont les conditions qui peuvent favoriser ou initier le foudroyage du terrain, de façon à ce que le minerai puisse être avantageusement récupéré dans les points de soutirage. En second lieu, il est impératif de pouvoir assurer la permanence de ces structures, des galeries qui relient les points de soutirage entre eux et avec les autres services tels les chutes à minerai, les garages, etc.

Cette méthode de minage tire donc profit des facteurs qui, combinés entre eux, amènent un massif rocheux à se disloquer en blocs et à perdre son état d'équilibre.

1.3 TERMINOLOGIE UTILISEE

Dans l'optique énoncée au cours de notre recherche bibliographique, nous avons recueilli les termes utilisés dans cette mine d'amiante. A cause de la méthode de minage, aucun pilier n'est requis, sauf au niveau des cônes et des galeries d'exploitation, situés sous les blocs foudroyés.

Nous avons donc constatés qu'il n'y a que deux (2) termes utilisés, soit:

- le pilier de couronne ou "crown pillar"
- le pilier principal et secondaire ou "major et minor apex"

Les figures 1.2 et 1.3, tirées d'une publication rédigée par cette compagnie, illustrent ces types de piliers. Il est intéressant de remarquer l'illustration du pilier de couronne apparaissant à la figure 1.2. Nous avons probablement là l'explication de l'origine du terme "crown pillar". En effet, la forme particulière du massif de protection découpé au-dessus des galeries de soutirage dans la méthode dite des "grizzly", ressemble étrangement à une couronne de roi, avec ses pointes dirigées vers le haut.

Les piliers ou "apex", illustrés à la figure 1.3, doivent assurer la stabilité des galeries de roulage et des points de soutirage dans la méthode des "LHD". Nous ne retiendrons pas ces termes pour notre étude mais ils peuvent être utiles pour une meilleure compréhension de l'histoire de cas de cette mine.

1.4 ELEMENTS DE CONCEPTION DU/DES PILIERS DE SURFACE

A défaut de nous fournir de l'information sur des piliers de surface, cette opération nous enseigne une technique d'évaluation du massif rocheux peu dispendieuse et réellement utile aux opérateurs. En effet, il peut être très utile, dans le cadre de cette étude, de savoir quelles sont les caractéristiques naturelles qui influencent le plus la stabilité du massif rocheux? A l'opposé, de savoir comment agir sur ces mêmes caractéristiques afin de prévenir son effondrement ou si l'on veut, de maintenir l'état d'équilibre de la masse rocheuse? En dernier lieu, de connaître quels sont les effets en surface causés par l'effondrement d'une masse importante de roche?

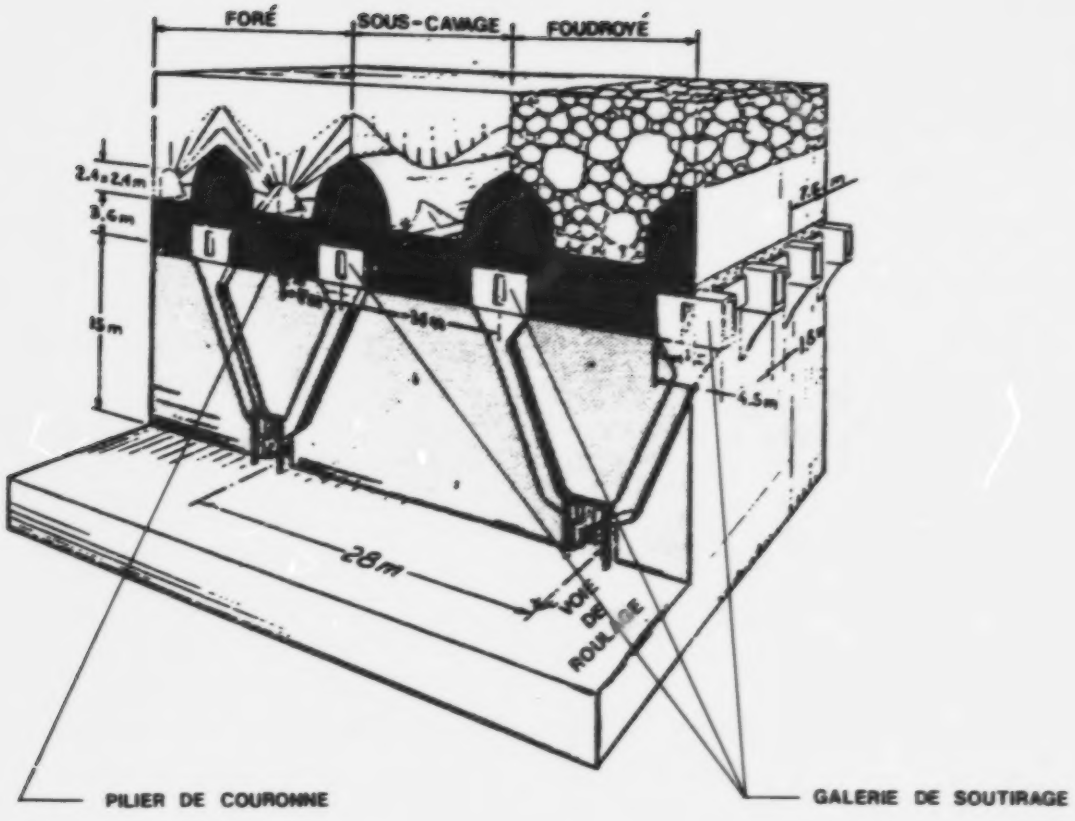


FIG. 1.2 METHODE DES "GRIZZLY"

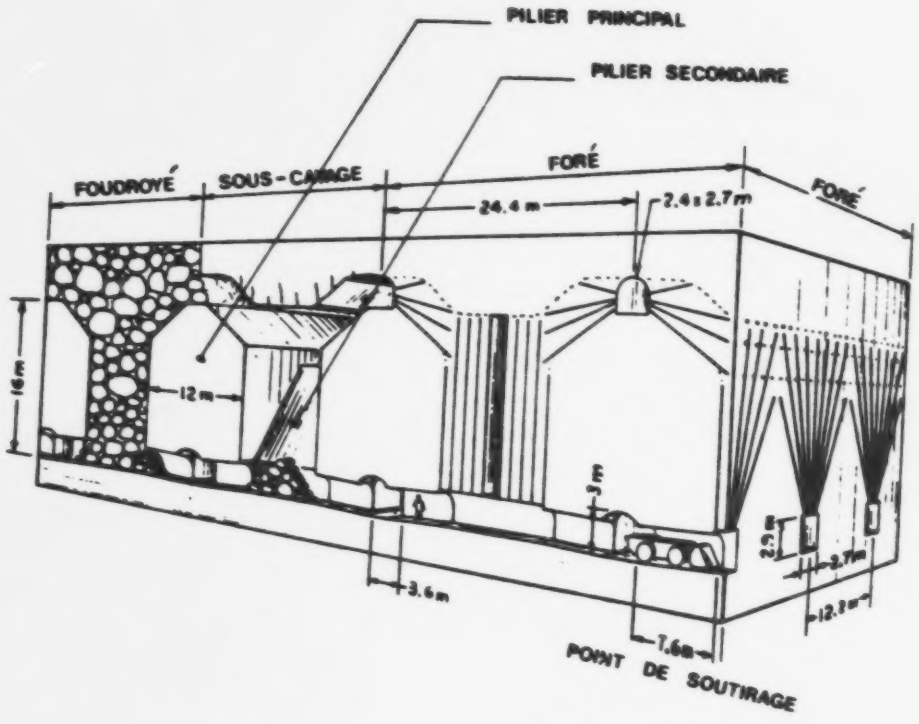


FIG. 1.3 PILIERS PRINCIPAL ET SECONDAIRE

Pour des raisons différentes des nôtres, l'équipe d'ingénieurs de cette mine s'est déjà posé ces questions. Afin de pouvoir y répondre, elle a compris la nécessité de développer un outil d'analyse efficace. Cet outil est à la base une technique d'évaluation du massif rocheux dans laquelle le maximum d'informations est traité. Cette technique a pour but principal d'aider à la conception des chantiers de foudroyage et des ouvertures de service. Elle sera décrite plus en détails à la section 1.4.8 du présent chapitre.

1.4.1 Etude des conditons d'eau

La perméabilité du pilier de surface fracturé (foudroyé en blocs) est assez élevée pour empêcher le développement de pression d'eau dans celui-ci. Aucun problème d'infiltration d'eau n'a été signalée par la direction de la mine et aucune étude hydrogéologique locale n'a été effectuée.

1.4.2 Sols au-dessus de la zone minéralisée

Afin d'éviter des problèmes de dilution par le mort-terrain, ce dernier a été complètement enlevé dans la région d'influence de la mine. L'épaisseur du mort-terrain se situait autour de 9 m. Pendant quelques années, des résidus de moulin ont été déposés dans la zone d'influence, au-dessus des chantiers d'abattage. Ces résidus ont causé de réels problèmes de dilution et ont été la cause de pertes de minerai. Du point de vue de la sécurité, aucun problème n'est survenu.

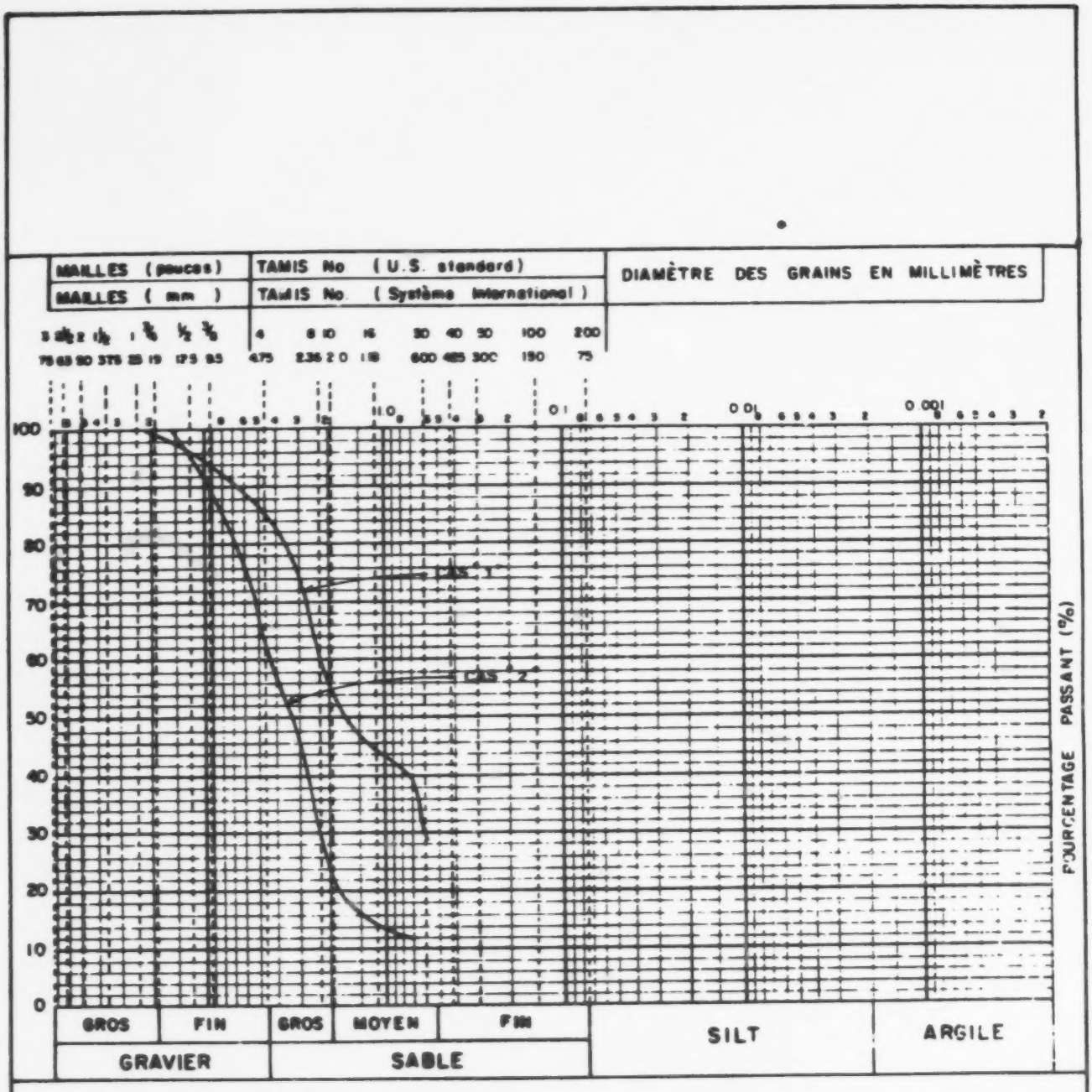
Les dangers potentiels de liquéfaction des anciens résidus présents dans le massif rocheux fracturé sont pratiquement nuls: la granulométrie grossière (fig. 1.4) des résidus et du massif rocheux confère une bonne perméabilité au milieu et les possibilités de développement de pressions d'eau importantes dans le massif sont minimes, sinon nulles. Le remplissage actuel est composé du tout venant de la mine à ciel ouvert et ne présente aucun problème.

1.4.3 Modélisation de la mine

Aucun modèle n'a été utilisé à cette mine étant donné la configuration massive du gisement.

1.4.4 Mécanique des roches

Le programme de mécanique des roches appliqué par la direction s'appuie sur le système de classification du massif rocheux de Laubscher (1977). Cette classification est détaillée plus loin dans le texte, soit à la section 1.4.8. La description des carottes de forage et la cartographie des galeries demeurent des données de première importance dans l'application de ce programme. De plus, les informations recueillies auprès des mineurs peuvent être très importantes. En effet, l'implication des mineurs dans un programme de surveillance (mécanique des roches, sécurité ...) apporte de précieuses données qui aident à la conception et/ou au réajustement des plans miniers. La présence d'eau signalée par un foreur ou les difficultés de forage sont des exemples concrets que la direction prend en ligne de compte dans son programme de mécanique des roches. Le programme est complété par des tournées mensuelles de surveillance systématique de la stabilité.



COURBES GRANULOMETRIQUES DE DEUX ECHANTILLONS

FIG. 1.4 GRANULOMETRIE DES RESIDUS DE MINES

1.4.5 Soutènement

Au cours des premières phases de développement et d'extraction du minerai, les supports employés étaient du type passif: les galeries au-dessus des "grizzly" étaient entièrement construites de béton et les sorties principales renfoncées avec des poutres d'acier nommées "steel sets". Par contre, depuis quelques années, la direction de la mine a décidé d'intervenir directement sur le massif fragmenté en utilisant des supports du type actif, tels les boulons d'ancrage cimentés, les câbles cimentés et la combinaison boulons / treillis métalliques / béton projeté sous pression.

Ce type de support est l'aboutissement logique d'une philosophie basée sur la reconnaissance du rôle prépondérant que joue la structure du massif rocheux au niveau de la stabilité générale des ouvertures. Depuis quelques années, cette compagnie démontre que l'application d'un programme de mécanique des roches, axé principalement sur la description des carottes de forage et de la cartographie de toutes les galeries disponibles, peut conduire à des résultats pratiques, rentables et efficaces.

L'élaboration des plans miniers est principalement basée sur le pointage obtenu par la classification. Les figures 1.1, 1.5 et 1.6 illustrent l'application de la méthode de classification dans la conception des plans miniers. La figure 1.1 montre une section verticale (coupe transversale) du gisement dans laquelle sont illustrées les différentes classes de ro-

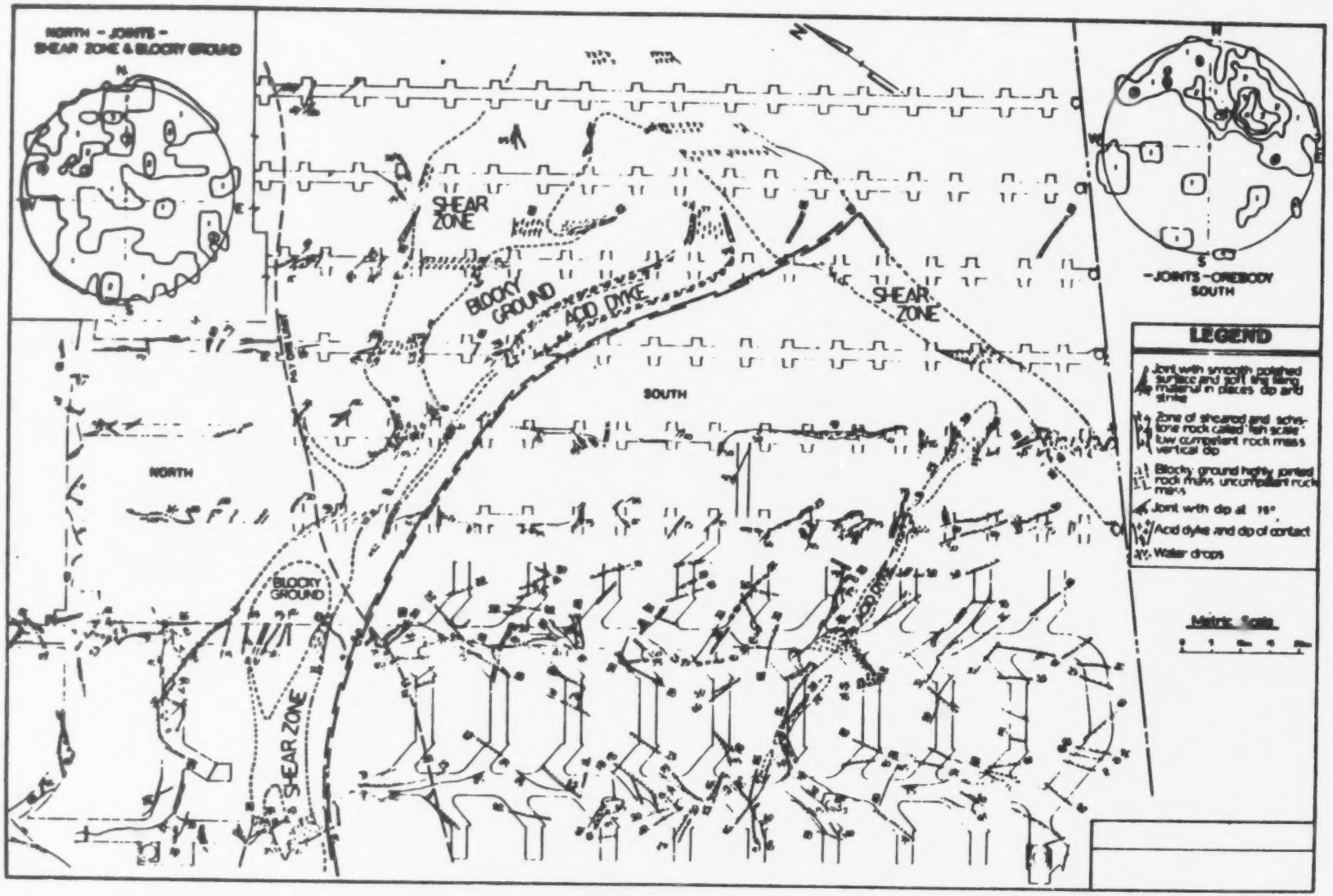


FIG. 1.5 GÉOLOGIE STRUCTURALE ET ÉTUDES STATISTIQUES DES JOINTS POUR UN NIVEAU DONNÉ

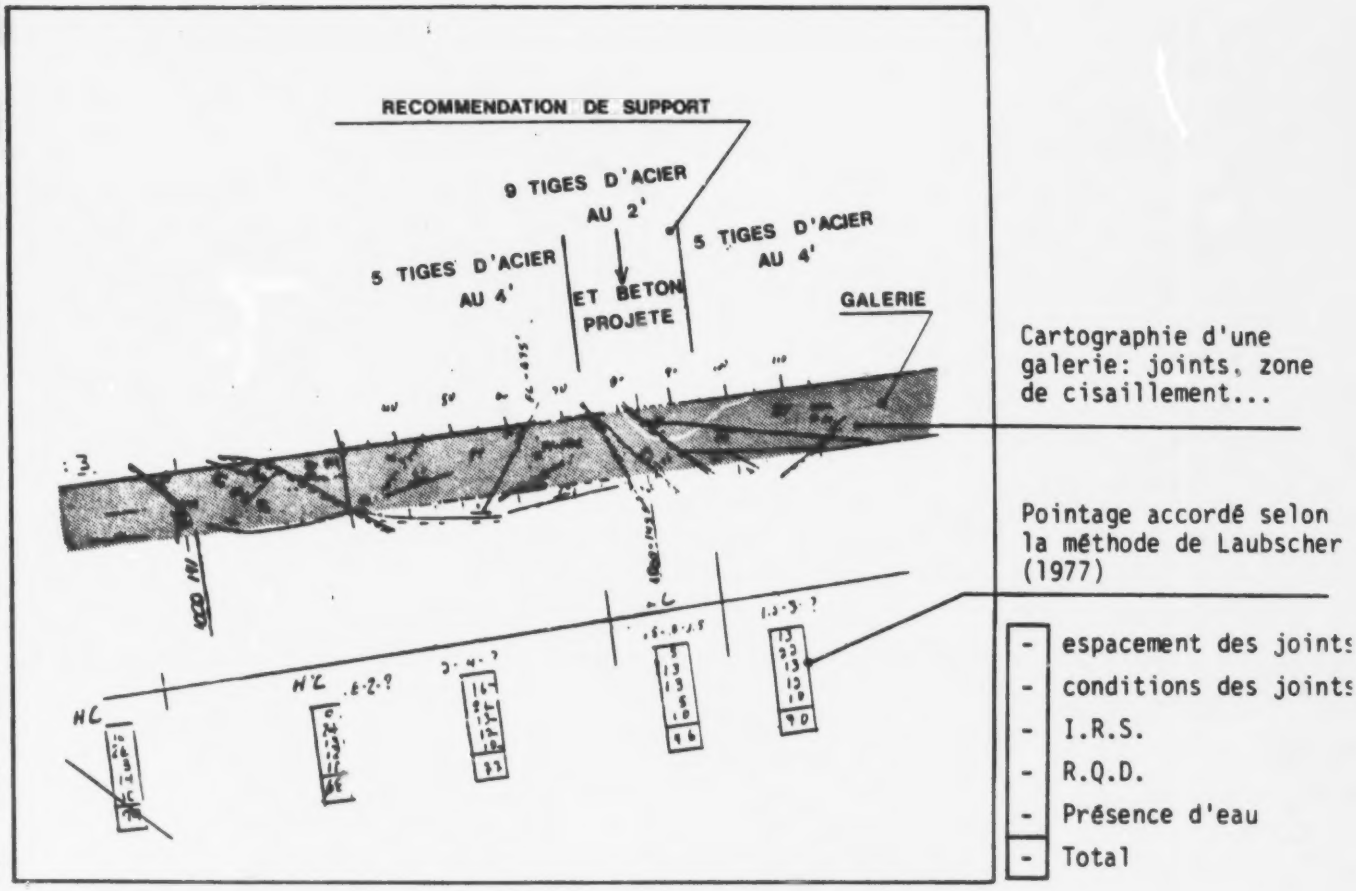


FIG. 1.6 EXEMPLE D'UTILISATION DE LA METHODE DE LAUBSCHER DANS UNE GALERIE

ches rencontrées. La figure 1.5 détaille une vue en plan d'un niveau: la géologie structurale et des études statistiques des joints aident à effectuer des réajustements des plans miniers et à prédire les zones de faiblesse que les galeries traverseront. La figure 1.6 illustre un exemple pratique où la concentration de support augmente dans une zone de faiblesse (pointage de la roche = 46). Cette intervention active de la direction représente une application directe de la méthode permettant de mieux contrôler les coûts de soutènement; et surtout d'utiliser la quantité et le type de support approprié à chaque situation.

1.4.6 Instrumentation/modes de contrôle

Un programme de surveillance de la subsidence a permis de déterminer précisément la zone d'influence de minage au-dessus de la mine. Des mesures d'affaissement en surface et des lectures provenant d'extensomètres installés en profondeur ont donné comme angle d'influence ou de subsidence 53° avec l'horizontale. En surface, la localisation de la limite visible d'affaissement est obtenue par un arpentage annuel effectué à l'aide de théodolites standards.

Le groupe rencontré semblait assez satisfait des instruments employés. Deux extensomètres et six ancrages ont été installés dans des trous forés à partir de la surface dont les axes longitudinaux ont été orientés de façon à former un angle minimal avec le plan de subsidence, ce qui permet de quantifier le déplacement du massif et éventuellement, de déterminer la progression horizontale de la zone de subsidence.

L'équipe utilise cet instrument depuis près de quatre années sans avoir expérimenté de problème majeur avec le mécanisme. Au niveau des ouvertures souterraines, il existe à cette mine une politique qui oblige le préposé du département de mécanique des roches à évaluer bi-mensuellement la qualité des galeries. Cette tournée d'inspection a pour but de vérifier la condition du support, d'évaluer l'effet du minage sur les ouvertures et de rapporter tout signe de changements. Dans ces conditions, l'on espère pouvoir corriger les situations dès les premiers signes d'instabilité.

1.4.7 Géométrie des piliers de surface

L'unique pilier de surface de cette mine a été fourdroyé en blocs depuis longtemps. Seuls demeurent les piliers principaux et secondaires surplombant les galeries de soutirage et de roulage, tels qu'illustrés aux figures 1.2 et 1.3.

1.4.8 Evaluation du massif rocheux

L'évaluation du massif rocheux est basée sur celle proposée par Laubscher (1977). Dans cette classification, cinq (5) paramètres sont pris en considération soit:

1. R.Q.D. (Rock quality designation)
2. I.R.S. (Intact Rock Strength)
3. Espacement des joints
4. Condition des joints
5. Présence d'eau

Il est à noter que cette classification a été développée à partir de celle proposée par Bieniawski (1974). Chacun des cinq (5) paramètres choisis par Laubscher possède une échelle de valeur propre: un système de pointage basé sur des critères pré-établis par l'auteur, sert à qualifier la roche (tableau 1.1, figure 1.7, tableau 1.2).

La figure 1.8 montre un exemple de pointage calculé à partir d'un échantillon de roche provenant d'une carotte de forage. La somme des points alloués à chacun des paramètres définie la classe à laquelle appartient la roche. Cinq (5) classes de roches caractérisent la classification de Laubscher: chacune d'elle possède un intervalle de vingt (20) points, couvrant ainsi les valeurs comprises entre 0 et 100 (tableau 1.1). Une roche possédant un total de 92 serait donc une roche très compétente, de classe 1A. Laubscher a également tenu compte de certains facteurs d'ajustement du pointage de base du massif rocheux pour tenir compte d'applications précises. Parmi ces facteurs, on retrouve les altérations par les agents atmosphériques, les conditions et les changements des contraintes naturelles du terrain, la direction et le pendage des plans de faiblesse et l'effet des sautages. Des ajustements permettent donc aux opérateurs de tenir compte des conditions particulières rencontrées dans leur exploitation. Il faut cependant noter que ces ajustements ou pourcentages de réduction du pointage initial attribué à la roche doivent être faits par des personnes possédant une bonne expérience dans les chantiers d'exploitation souterraine. Le tableau 1.3 montre les pourcentages possibles de réduction des pointages alloués à quatre des cinq paramètres ci-haut

TABLEAU 1.1

CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX (LAUBSCHER, 1977)

Table 1 Classification of variations in jointed rock masses

Class	1		2		3		4		5	
Rating	100–81		80–61		60–41		40–21		20–0	
Description	Very good		Good		Fair		Poor		Very poor	
Sub-classes	*A*	*B*	*A*	*B*	*A*	*B*	*A*	*B*	*A*	*B*
Item										
1 RQD, %	100–91	90–76	75–66	65–56	55–46	45–36	35–26	25–16	15–6	5–0
Rating	20	18	15	13	11	9	7	5	3	0
2 IRS, MPa	141–136	135–126	125–111	110–96	95–81	80–66	65–51	50–36	35–21	20–6 5–0
Rating	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1 0
3 Joint spacing	Refer to Table 2									
Rating	30									0
4 Condition of joint	45°				Basic angle of friction					6°
	Refer to Table 3									
Rating	30									0
5 Groundwater	Inflow per 10-m length		0		25 l/min		25–125 l/min		125 l/min	
	OR									
	Joint water pressure / Major principal stress		0		0.0–0.2		0.2–0.5		0.5	
	OR									
	Description		Completely dry		Moist only		Moderate pressure		Severe problems	
Rating	10				7		4		0	

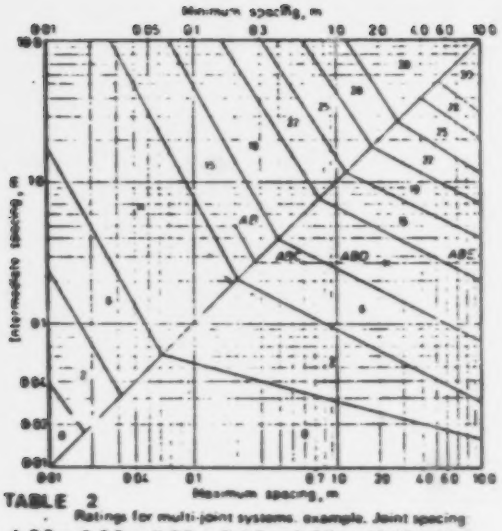


TABLE 2

Ratings for multi-joint systems, example. Joint spacing *A*, 0.2 m, *B*, 0.5 m, *C*, 0.6 m, *D*, 1.0 m; *E*, 7.0 m, *AB*, 15; *ABC*, 6, *ABD*, 11, *ABE*, 15

FIG. 1.7 POINTAGE ACCORDE SELON L'ESPACEMENT DES JOINTS (LAUBSCHER, 1977)

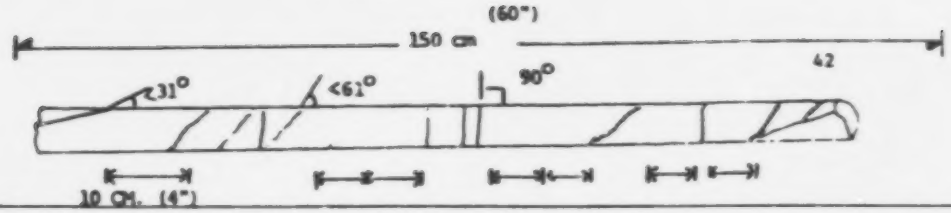
TABLEAU 1.2

EVALUATION DES CONDITIONS DE JOINTS

(LAUBSCHER, 1977)

Table 3 Assessments of joint conditions (adjustments as combined percentages of total possible rating of 30)

Parameter	Description	Percentage adjustment
(A) Joint expression (Large-scale)	Wavy unidirectional	90 90
	Curved	80 80
	Straight	70 70
(B) Joint surface (Small-scale)	Striated	90 85
	Smooth	84 60
	Polished	50 50
(C) Alteration zone	Softer than wall rock	90 70
(D) Joint filling	Coarse hard-sheared	90 90
	Fine hard-sheared	80 80
	Coarse soft-sheared	70 70
	Fine soft sheared	60 50
	Gouge thickness < Irregularities	40 35
	Gouge thickness > Irregularities	20 12
	Flowing material > Irregularities	11 0



1) R.D.Q. Or Longer)

$$\frac{\sum_{h\geq 7} (10\text{ cm}) \times 100}{150\text{ cm}} = 47\% \longrightarrow \text{rating} = \boxed{11}$$

voir tableau 1.1

2) JOINT SPACING

Joint ∢	number	Apparent Spacing M	True Spacing	cr.	M.
0 - 30° =	2	150/2 = .75	75 X sin 15° =	19	0,19 INT.
31° - 60° =	6	150/6 = .25	25 X sin 45° =	17	0,17 MIN
61° - 90° =	5	150/5 = .30	30 X sin 75° =	29	0,29 MAX

RATING $\boxed{2}$

voir tableau 1.2

3) JOINT CONDITION

EXAMINE:

a)	Expression	Ex. 100%
b)	Joint Surface	85%
c)	Alteration	95%
d)	Filling	90%

TOTAL RATING = 30 X (1.0 X 0,85 X 0,95 X 0,90) = $\boxed{21}$

voir tableau 1.3

4) INTACT ROCK STRENGTH (Uniaxial compressive stregnth) NX Core

mean Results of good samples reference scale.

MPA (PSI) ⟶ RATING

Ex. 145 MPA (21000 PSI) $\boxed{10}$

voir tableau 1.1

5) WATER From Drillers when drilling

Dry B.H. rating 10

Wet B.H. rating 4. recorded by drillers

Ex. Rating $\boxed{10}$

TOTAL RATING: $\sum$ ratings = 11 + 2 + 21 + 10 + 10

= 54 ROCK CLASS III A

FIG. 1.8 EXEMPLE DE POINTAGE ALLOUÉ À UN ÉCHANTILLON DE ROCHE (CAROTTE DE FORAGE) SELON LA MÉTHODE DE LAUBSCHER (1977)

TABLEAU 1.3 : AJUSTEMENT DES POINTAGES (LAUBSCHER, 1977)

TOTAL POSSIBLE REDUCTIONS, %

	RQD	IRS	JOINT SPACING	CONDITION OF JOINTS	TOTAL
Weathering	95	96		82	75
Field and induced stresses				120-76	120-76
Changes in stress				120-60	120-60
Strike and dip orientation			70		70
Blasting	93			86	80

mentionnés. Notez que l'ajustement total est le produit des facteurs d'ajustements particuliers à chacune des conditions retrouvées dans le massif étudié. Cette procédure permet ainsi d'utiliser la méthode de classification de façon uniforme, i.e. que l'évaluation de base peut être la même pour tous les cas étudiés (toutes les mines) alors que les ajustements permettent de tenir compte de particularités propres à tel ou tel massif, telle ou telle méthode de minage, etc...

Dans le cas qui nous intéresse, les étapes suivies dans L'EVALUATION DU MASSIF ROCHEUX sont détaillées à la fig. 1.9. Les données obtenues à partir des carottes de forage sont accumulées dans un programme informatisé, de même que les données provenant de la cartographie des galeries ainsi que celles du laboratoire de mécanique des roches, s'il y a lieu. Le programme informatisé permet d'épargner du temps dans le calcul des données recueillies pour chaque zone et évite des erreurs de manipulation. L'évaluation des carottes de sondage ou la cartographie des galeries peuvent être effectuées par un ingénieur, un géologue ou encore un technicien. La technique d'identification requiert cependant de deux (2) à trois (3) mois de pratique avant que l'utilisateur puisse l'appliquer avec aisance et efficacité.

Etant donné qu'une personne entraînée peut classifier environ 80 m de galerie et 200 m de carottes de forage par quart de travail, le personnel affecté à cette tâche doit être ajusté selon la dimension de la mine et l'ampleur des travaux d'exploration réalisés. Les zones de cisaillement sont notées avec soin car elles peuvent entraîner des faiblesses majeures dans les infrastructures souterraines.

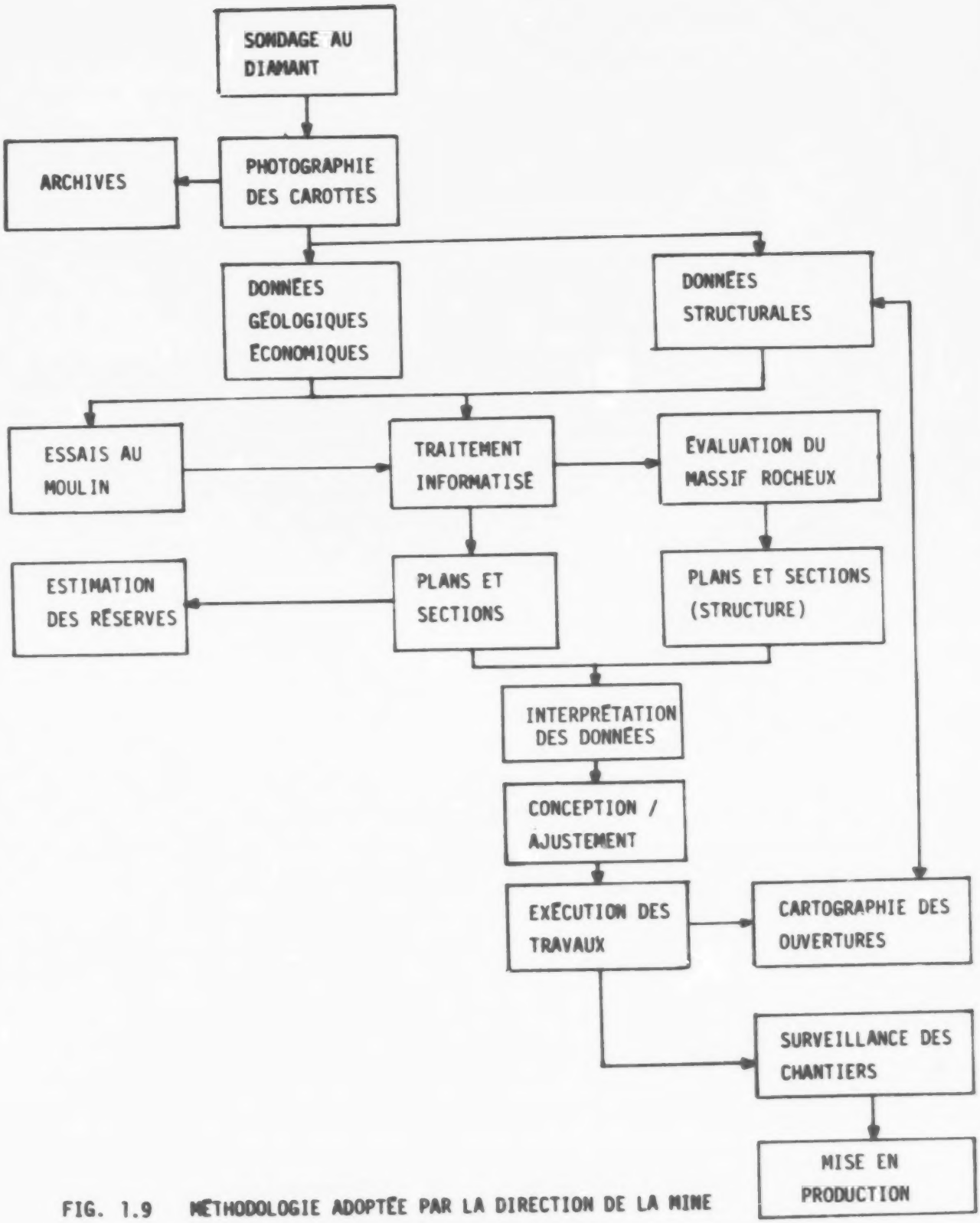


FIG. 1.9 MÉTHODOLOGIE ADOPTÉE PAR LA DIRECTION DE LA MINE DANS L'ÉVALUATION DU MASSIF ROCHEUX

Avec la classification adoptée par la direction, il est possible de vérifier si les données prédites à l'aide des carottes de forage sont semblables à celles observées "in situ". En général, les pointages obtenus à partir des carottes sont voisins de ceux obtenus dans les galeries. Cependant dans la cartographie des galeries, une attention particulière doit être accordée à la différenciation entre les joints naturels de la roche et ceux qui auraient pu être créés par le dynamitage de l'ouverture. Ces derniers devant obligatoirement être exclus de l'évaluation.

Notons enfin que la bonne corrélation entre les résultats des sondages et la situation réelle a été obtenue avec un patron de forage au diamant de 33 m X 33 m dont la longueur moyenne des trous est d'environ 100 m.

Parmi les paramètres utilisés dans la classification, la résistance en compression simple de la roche intacte est déterminée en laboratoire. La figure 1.10 montre un exemple d'essai en compression simple: dans ce cas-ci, la rupture s'est produite à 33 800 psi (233 MPa). Il faut cependant noter que la direction ne met pas l'emphase sur de tels essais et que les valeurs obtenues à partir d'essais de poinçonnement (load point test) pourraient également être satisfaisantes même si, règle générale, de tels essais sont importants car ils génèrent de l'information. Dans ce cas particulier, le massif est si fortement jointé que la connaissance de la résistance de la roche est secondaire par rapport à celle du massif.

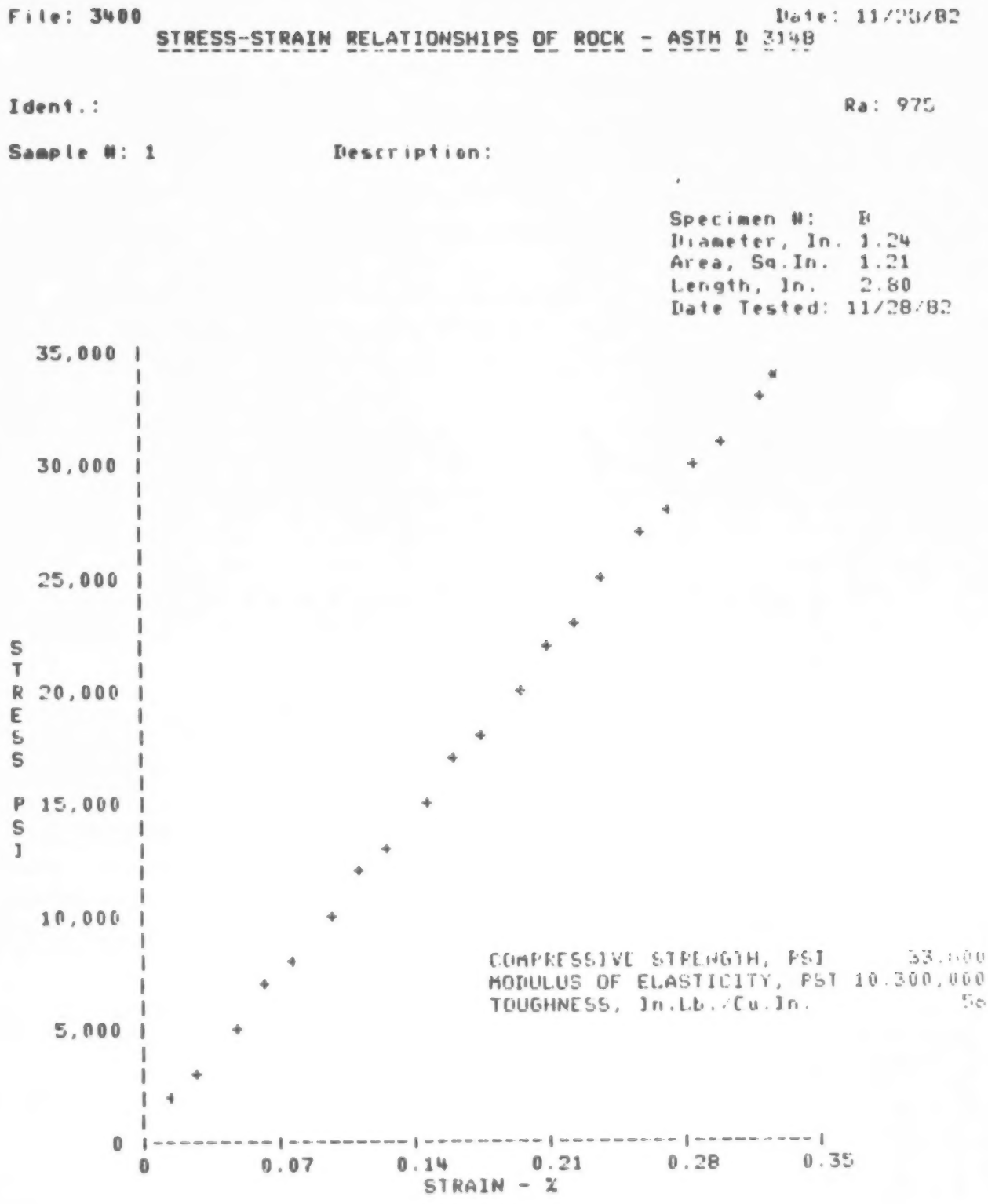


FIG. 1.10 ESSAIS EN COMPRESSION SIMPLE D'UN ÉCHANTILLON ROCHEUX

1.4.9 Divers

Aucune autre information ne se rattache au sujet traité dans cette étude.

1.5 BILAN DE LA VISITE

Cette histoire de cas détaille une méthode de travail adaptée par la direction en fonction des problèmes de stabilité rencontrés dans les chantiers souterrains. Cette méthode s'appuie essentiellement sur la description du massif rocheux. La direction a su appliquer d'une façon simple et économique une classification des massifs rocheux, en l'occurrence celle de Laubscher (1977). Cette classification permet à la direction de choisir le type de support requis pour assurer la stabilité des galeries, points de soutirage et autres ouvertures requises. Elle offre également la possibilité d'estimer la surface requise pour initier la chute de ces blocs et d'évaluer leurs dimensions approximatives. Cette classification peut également être utile à la détermination des patrons de forage requis pour chaque classe de roche, à la localisation des zones de faible compétence (afin si possible d'éviter d'y creuser des galeries de service, entrepôts, etc...). Une dernière application de la méthode consiste à obtenir directement à partir des classes de roche, une première appréciation de l'angle d'affaissement du massif.

La méthode ne saurait prétendre résoudre tous les problèmes; par contre, il est bon de réaliser que sa force réside sur une connaissance poussée du matériel dans lequel le minage est effectué. Plus grande sera cette connaissance, meilleures seront les chances d'en contrôler les comportements.

Cette procédure est utilisée avec succès depuis 7 années et prouve qu'il est possible de modifier et de contrôler le comportement du massif par l'application d'une méthode axée sur un système de pointage.

Au travers des diverses étapes que la direction a développées pour le contrôle de la stabilité des ouvrages souterrains, on observe qu'il est possible de consigner, à partir des sondages au diamant, beaucoup plus d'informations que ce qui est normalement fait par l'industrie minière.

MINE NO 2

MINES DE CUIVRE, OR ET ARGENT: ABATTAGE PAR COUPE ET REMBLAI

TABLE DES MATIERES

PAGE

2.0 MINE DE CUIVRE, OR ET ARGENT: ABATTAGE PAR COUPE ET REMBLAI 192

2.1 BREF HISTORIQUE DE LA MINE 192
2.2 METHODE DE MINAGE 193
2.3 TERMINOLOGIE UTILISEE 195
2.4 ELEMENTS DE CONCEPTION DU/DES PILIERS DE SURFACE 197

2.4.1 Etude des conditions d'eau 197
2.4.2 Sols au-dessus de la zone minéralisée 199
2.4.3 Modélisation de la mine 200
2.4.4 Mécanique des roches 200
2.4.5 Soutènement 202
2.4.6 Instrumentation/modes de contrôle 203
2.4.7 Géométrie des piliers de surface 203
2.4.8 Evaluation du massif rocheux 206
2.4.9 Divers 211

2.5 BILAN DE LA VISITE 214

MINE NO 2

2.0 MINES DE CUIVRE, OR ET ARGENT: ABATTAGE PAR COUPE ET REMBLAI

2.1 BREF HISTORIQUE DE LA MINE

La compagnie minière possède plusieurs gisements dont deux sont actuellement en exploitation. Ces deux derniers sont en production depuis le début des années 50. Le cuivre, l'or et l'argent sont les trois types de minerais exploités dans chacun de ces gisements. La production annuelle totale prévue pour 1983 est environ 900 000 tonnes.

Les gisements s'étendent dans des zones cisaillées et altérées qui sont contenus dans un massif d'anorthosite. Ce massif est d'âge précambrien et les principaux types d'altération rencontrés sont des minéraux carbonatés, la séricite et la chlorite.

Les deux gisements opérationnels sont composés de lentilles minéralisées qui s'étendent de 60 à 240 m de profondeur, de 30 à 240 m de longueur et de 2 à 20 m de largeur. Le pendage des lentilles varie de 35 à 85°.

Les niveaux d'exploitation sont distancés de 46 m et, pour un gisement en particulier, de 92 m à partir d'un certain niveau situé plus en profondeur. Les puits descendent jusqu'aux niveaux -1 000 m et -1 188 m.

2.2 METHODE DE MINAGE

Dans les débuts de la mise en exploitation, les méthodes de minage utilisées étaient "coupe et remblai", "chambres magasins" et la "méthode à gradins inversés abattus par longs trous".

Aujourd'hui la compagnie minière n'utilise plus que la méthode coupe et remblai pour l'exploitation de ses deux gisements. Le remplissage des chantiers est devenu nécessaire avec l'augmentation des pressions dans les galeries de plus en plus profondes. La méthode coupe et remblai est plus coûteuse que les deux autres méthodes utilisées auparavant, mais elle permet un meilleur contrôle de la dilution. La récupération du minerai est de l'ordre de 95%. Les dimensions des chantiers suivent généralement les dimensions des lentilles minéralisées.

La figure 2.1 montre en plan et en coupe longitudinale les séquences de minage dans un chantier donné.

L'exploitation des chantiers débute en creusant un sous-niveau, à 8 m au-dessus de la galerie inférieure, le pilier ainsi formé étant exploité plus tard, avec le chantier inférieur. Certains chantiers commencent au niveau même avec une galerie dans l'éponte inférieure. Avec cette dernière méthode, on élimine un pilier et on augmente ainsi la récupération.

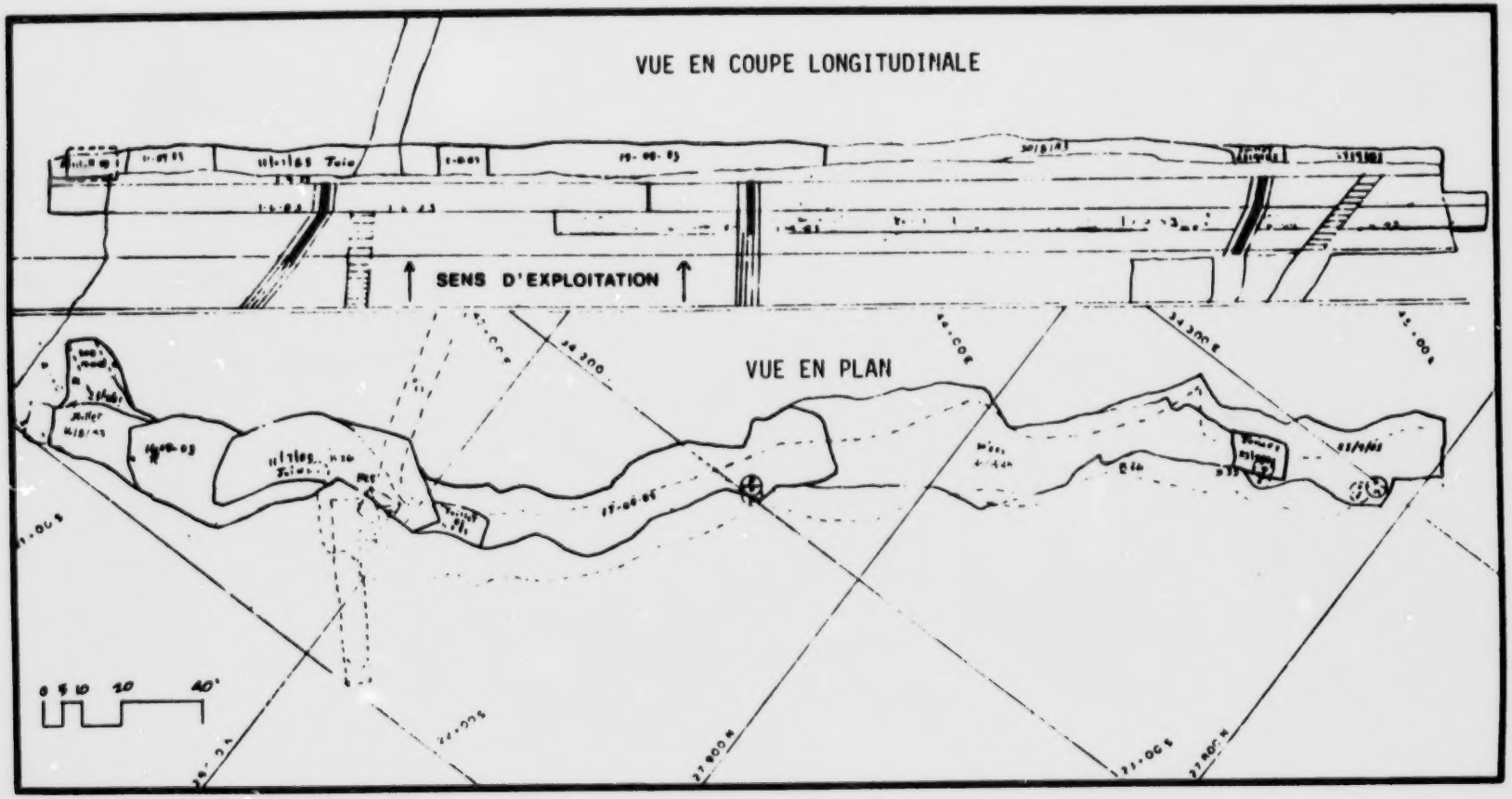


FIG. 2,1 SÉQUENCES DE MINAGE DANS UN CHANTIER

Les résidus du concentrateur sont utilisés comme matériel de remblayage. Le remblai hydraulique passe dans un cyclône pour éliminer les particules les plus fines. On obtient alors un sol silto-sableux. La figure 2.2 illustre la courbe granulométrique moyenne des résidus solides acheminés sous terre. La composition du remblai hydraulique à son arrivée dans les chantiers est de 60% solides - 40% liquide (% poids). La percolation s'effectue assez rapidement avec des vitesses de l'ordre de 15×10^{-2} cm/s. Il est à noter que certains chantiers sont remblayés à sec par des matériaux granulaires prélevés dans des bancs d'emprunt.

Le premier sous-niveau remblayé dans chaque chantier est maintenant consolidé sur deux mètres d'épaisseur selon la proportion suivante: 1 partie de ciment pour 8 parties de remblais. Cette procédure permet d'opérer avec une plus grande sécurité et diminue aussi la dilution du minerai.

2.3 TERMINOLOGIE UTILISEE

La terminologie utilisée en accord avec la méthode coupes et remblai se résume dans ce cas-ci aux expressions piliers inférieur ou supérieur, piliers temporaires et piliers de surface. Le pilier supérieur peut se comparer en quelque sorte au pilier de toit ("crown pillar") déjà décrit dans notre recherche bibliographique. Le pilier inférieur désigne le pilier de sol ("sill pillar") qui est laissé temporairement en place dans le bas des chantiers de façon à protéger les galeries, les points de soutirage, les accès... Comme l'indique sa définition, le pilier de sol est un pilier temporaire. Ce dernier est généralement constitué de minerai et est exploité à la fin de la vie du chantier sous lequel il réside.

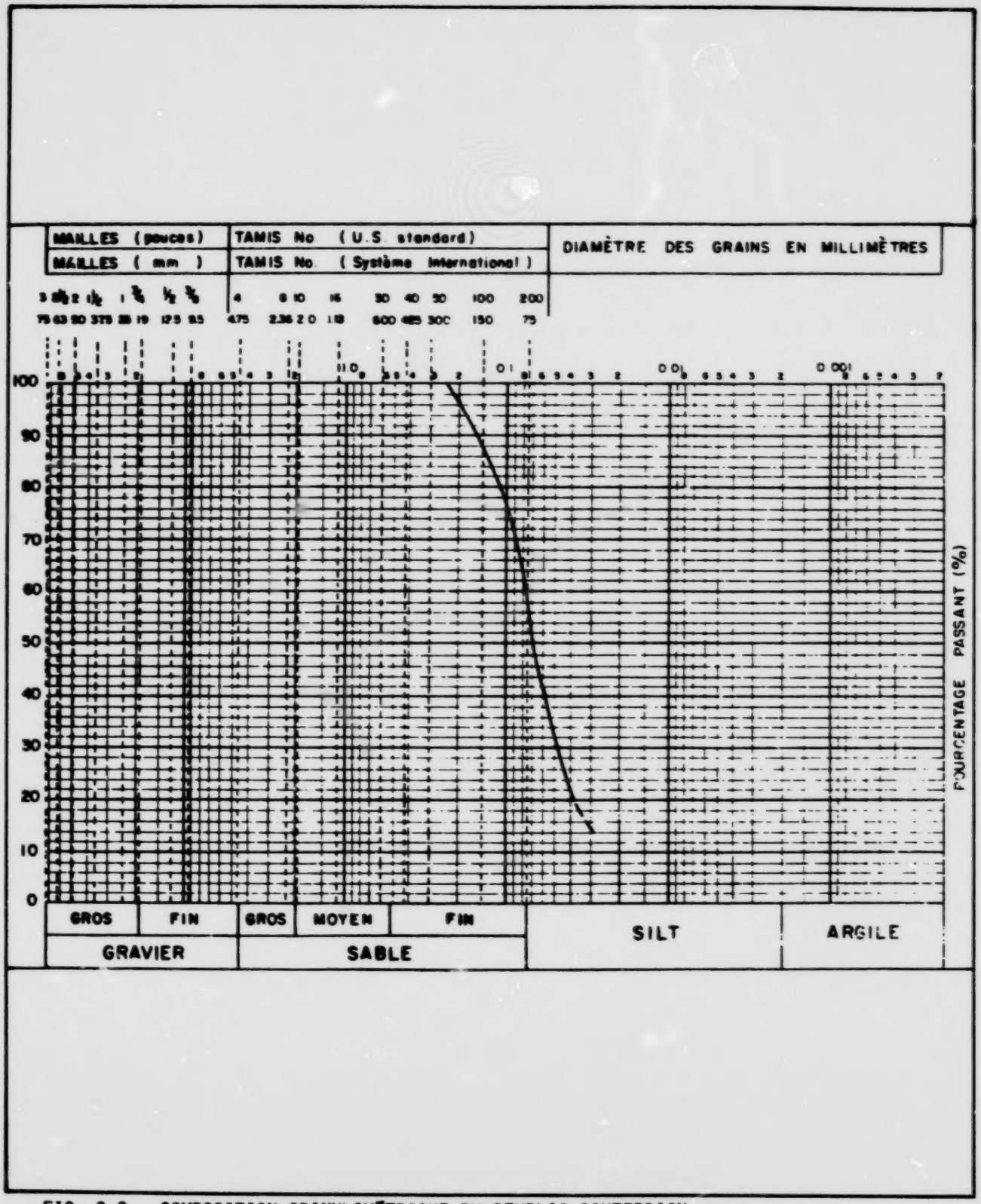


FIG. 2.2 COMPOSITION GRANULOMÉTRIQUE DU REMBLAI SOUTERRAIN

La masse rocheuse séparant les chantiers supérieurs du mort-terrain ou de la surface est appelée communément pilier de surface.

2.4 ELEMENTS DE CONCEPTION DU/DES PILIERS DE SURFACE

2.4.1 Etudes des conditions d'eau

La présence de lacs au-dessus des gisements à exploiter a incité la direction à prendre des mesures spéciales pour assurer la sécurité des chantiers souterrains. Ainsi, durant la phase d'exploration, de nombreux trous de forage traversant l'éponte supérieure ont été remplis de coulis de béton sous pression afin de consolider le massif rocheux et de le rendre moins perméable. Ce traitement était réservé à l'ensemble des forages qui se prolongeaient sous les lacs. Ce rideau protecteur fut justifié suite à la faible qualité de la roche détectée dans certaines parties du pilier de surface. L'analyse géologique des carottes de forage donne un pilier de surface hétérogène dans lequel des zones de "leaching" prennent place. Ces zones sont moins riches en minerai et montrent des propriétés mécaniques faibles: l'action de l'eau et les réactions chimiques avec les sulfures ont transformé en certains endroits la roche dure en un sol granulaire du type "gossan" (figure 2.3).

L'exploitation de la mine et l'arrivée constante d'oxygène dans les chantiers supérieurs ont contribué également à la formation de "gossan" dans le pilier de surface.

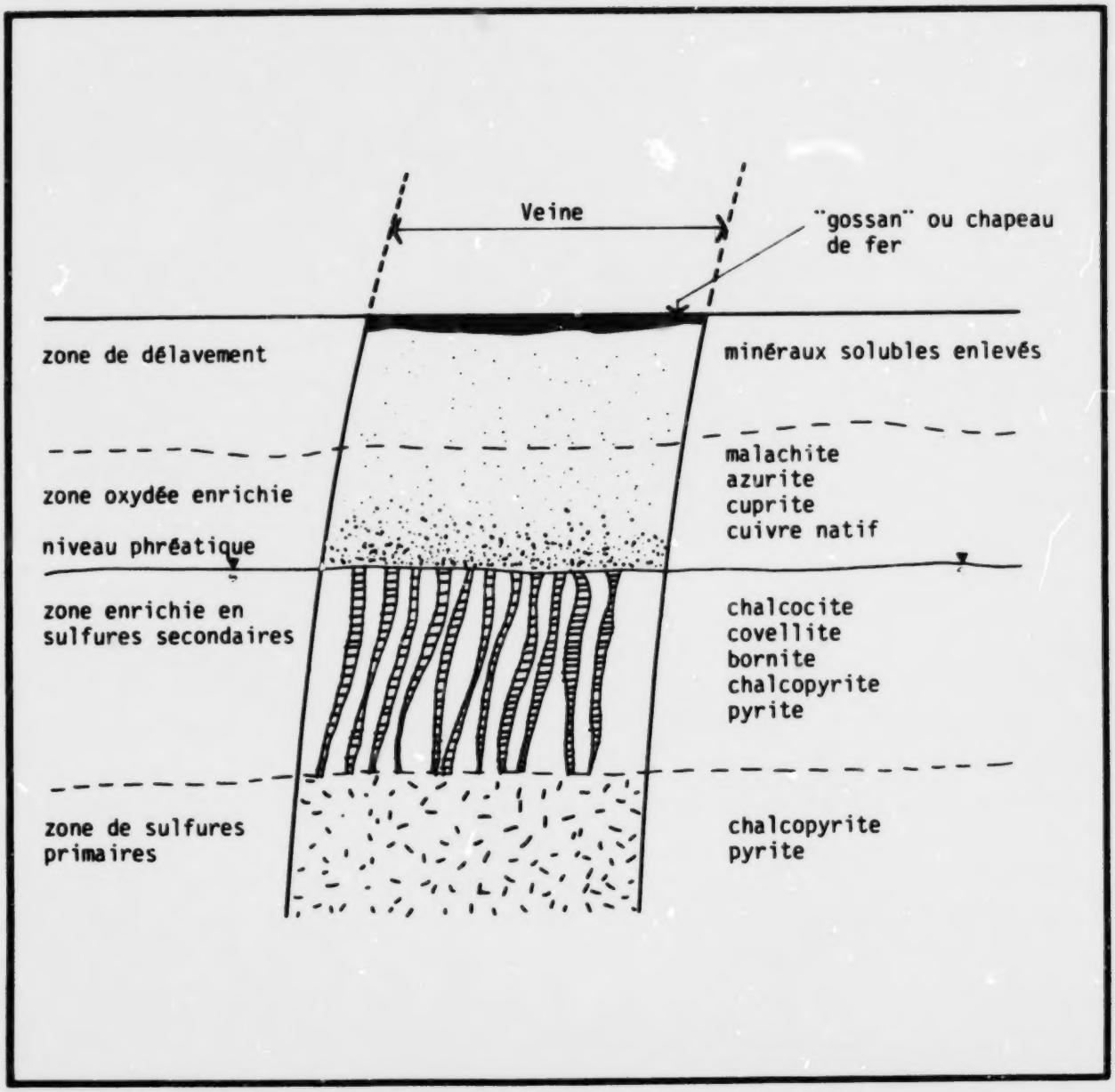


FIG. 2,3 SCHÉMA DES ZONES D'ALTÉRATION DANS UNE VEINE DE SULFURES (D'APRÈS MASON ET BERRY, 1968)

Les eaux de surface et souterraines et l'eau apportée par le remblayage hydraulique causent certains problèmes à la direction. L'opération à sec des chantiers est avant tout une question de sécurité, de rentabilité et de productivité. Aussi, pour assécher la mine, la direction a développé un système de pompage très efficace à différents niveaux des mines opérationnelles. De 0 à 40 m de profondeur, les pompes évacuent entre 80 et 90 L/s, alors que plus en profondeur le débit peut descendre jusqu'à 10 L/s. L'infiltration importante dans les chantiers supérieurs est due en grande partie aux failles et aux fractures développées dans le massif rocheux et aussi aux zones délavées devenues plus perméables.

2.4.2 Sols au-dessus de la zone minéralisée

Certains piliers de surface sont couverts de résidus de mine saturés d'eau et parmi ces piliers, il y en a un qui a été jugé plus critique par la direction et qui a fait l'objet d'études de stabilité par l'équipe d'ingénieurs en place et aussi par des consultants extérieurs. Les résultats de ces études ont donné 10 m d'épaisseur de mort-terrain au-dessus du pilier: des trous de forage et divers essais ont servi à établir le profil stratigraphique et les caractéristiques géotechniques des couches de sédiments. Les conditions de drainage ont été établies à partir d'essais de perméabilité et des piézomètres installés dans les trous de sondage ont permis de suivre l'évolution du niveau phréatique en fonction du pompage en surface et souterrain également.

2.4.3 Modélisation de la mine

Aucune modélisation de la mine n'a été effectuée.

2.4.4 Mécanique des roches

La direction veut implanter un programme de mécanique des roches axé principalement sur le comportement in situ du massif rocheux. A cette fin, la direction a récemment engagé un ingénieur en mécanique des roches qui aura comme principale tâche la collection des données de terrain et leurs interprétations.

L'implication du personnel minier dans un tel programme est nécessaire pour que celui-ci fonctionne bien et c'est pourquoi les contremaîtres ont un rapport à fournir sur la stabilité du roc et les conditions de leur chantier, et ce pour chaque poste de travail. A titre d'exemple, la figure 2.4 montre les types d'information que le contremaître peut cumuler dans son rapport.

Dans le but d'obtenir un meilleur contrôle sur les conditions locales de stabilité, la direction a autorisé une étude axée sur les méthodes et les procédures à développer pour garder le contrôle de la stabilité. La première étape est l'enregistrement continuel des données de terrain. Le rapport du contremaître est un exemple concret de cette procédure. La direction cherche également à inclure dans ses plans miniers certaines données structurales provenant de la cartographie des galeries: ces informations additionnelles aideront à

RAPPORT JOURNALIER DE POSTE SOUS TERRE

MINE: _____

DATE: ____ / ____ / ____ (AN / MOIS / JOUR)

POSTE _____

EMPLOYE		NUMERO DE COMPTE	HEURES (1- REG 2- SUPP. 3- DBL 4- STA 5- URG 6- DIM.)								TAUX HORAIRE TEMPORAIRE	CONTRAT	LIEU DE TRAVAIL	EQUIPEMENT		MINAGE				
NUMERO	NOM		01 FORER ET FAIRE SAUTER	02 RACLAGE	03 BOISAGE	04 CHARROYAGE	05 REMBLAYAGE	06 SERVICE						GENRE	NUMERO	TOT PIEDS FORES	1- ELARGISSEMENT 2- FRONT DE TAILLE 3- VOLEE	NBR. DE TIRS	NBR. JOZOJRE	NBR. SAUTES

EXPLOSIF			TRANSPORT			BOULONS				CABLES		STABILITE DU ROC							RESERVE POUR LE COMMIS						REMARQUES
ANFO 100%	ANFO 60%	GELATINE	CAPACITE TONNE	NOMBRE MINERAL	NOMBRE ITERALE	1- A EXTENSION 2- SPLIT SET 3- SWELLEX	CODE	3'	5'	7'	LONGUEUR	QUANTITE	1 INSPECTION	2	3	4	5 SECURITE	6	1		2		3		
													STRUCTURE		CHUTE DE ROC	ECLATEMENT DE ROC	EAU	COMMENTAIRES ET CONDITIONS	CODE	QUANTITE	CODE	QUANTITE	CODE	QUANTITE	
													ETAT	CONDITIONS	VOLUME										

FIG. 2,4 INTÉGRATION D'INFORMATIONS SUR LA STABILITÉ DU ROC DANS LE RAPPORT JOURNALIER DU CONTREMAÎTRE

mieux prédire le comportement du massif dans les nouveaux chantiers et galeries. L'application d'un système de classification des roches constitue la deuxième étape dans le contrôle de la stabilité locale. Ce système de classification aidera à délimiter les zones de diverses compétences caractérisant les sites miniers.

2.4.5 Soutènement

Le contrôle du toit et des murs s'effectue avec un boulonnage conventionnel. Les boulons utilisés sont de quatre types, soit les boulons à coquilles, à expansion, à friction "split-set stabilizers", à friction "Swellex" et les tiges à béton ancrées à la résine. Les boulons résinés et des câbles sont utilisés pour des cas spéciaux où la roche est peu compétente ou encore dans les chantiers larges.

Le remblayage des chantiers constitue une excellente façon de consolider les chantiers et la cimentation de certains piliers contribue aussi à l'accroissement de la stabilité des infrastructures souterraines.

L'expérience a montré que les ouvertures inférieures à 6 m de largeur ne nécessitent pas ou très peu de boulons d'ancrage, alors que les ouvertures plus larges entraînent souvent un boulonnage systématique des chantiers. Dans les chantiers de grande envergure, le patron de boulonnage peut être de 3 m x 3 m et les trous de 18 m de profond.

Les commentaires et les suggestions pertinentes des mineurs face au programme de soutènement sont soigneusement étudiés par la direction.

2.4.6 Instrumentation/modes de contrôle

Tous les chantiers sont inspectés mensuellement, incluant ceux terminés et situés en-dessous des lacs. Les chantiers supérieurs sont remblayés jusqu'à 2 m du toit, de façon à garder un accès pour l'inspection. Lors des tournées d'inspection, le ou les responsables passe(nt) en revue les divers chantiers selon l'ordre des endroits indiqués et numérotés sur un plan d'ensemble (figure 2.5). Chaque changement est noté et les roches qui ont chûté sont marquées à la peinture, afin de suivre plus aisément toute détérioration des piliers. Pour tout effondrement significatif, une enquête est entreprise. Des lectures de cellules de chargement sont également prises mensuellement et le niveau phréatique est suivi à l'aide de piézomètres.

La stabilité des piliers de surface est accrue par la présence du rideau de ciment dans l'éponte supérieure, par le boulonnage des chantiers supérieurs, le pompage continuel des eaux d'infiltration et le remblayage des chantiers.

2.4.7 Géométrie des piliers de surface

Le tableau 2.1 donne les dimensions de piliers de surface ainsi que les dimensions des chantiers sous-jacents. Un horizon de mort-terrain variant entre 3 et 7 m d'épaisseur re-

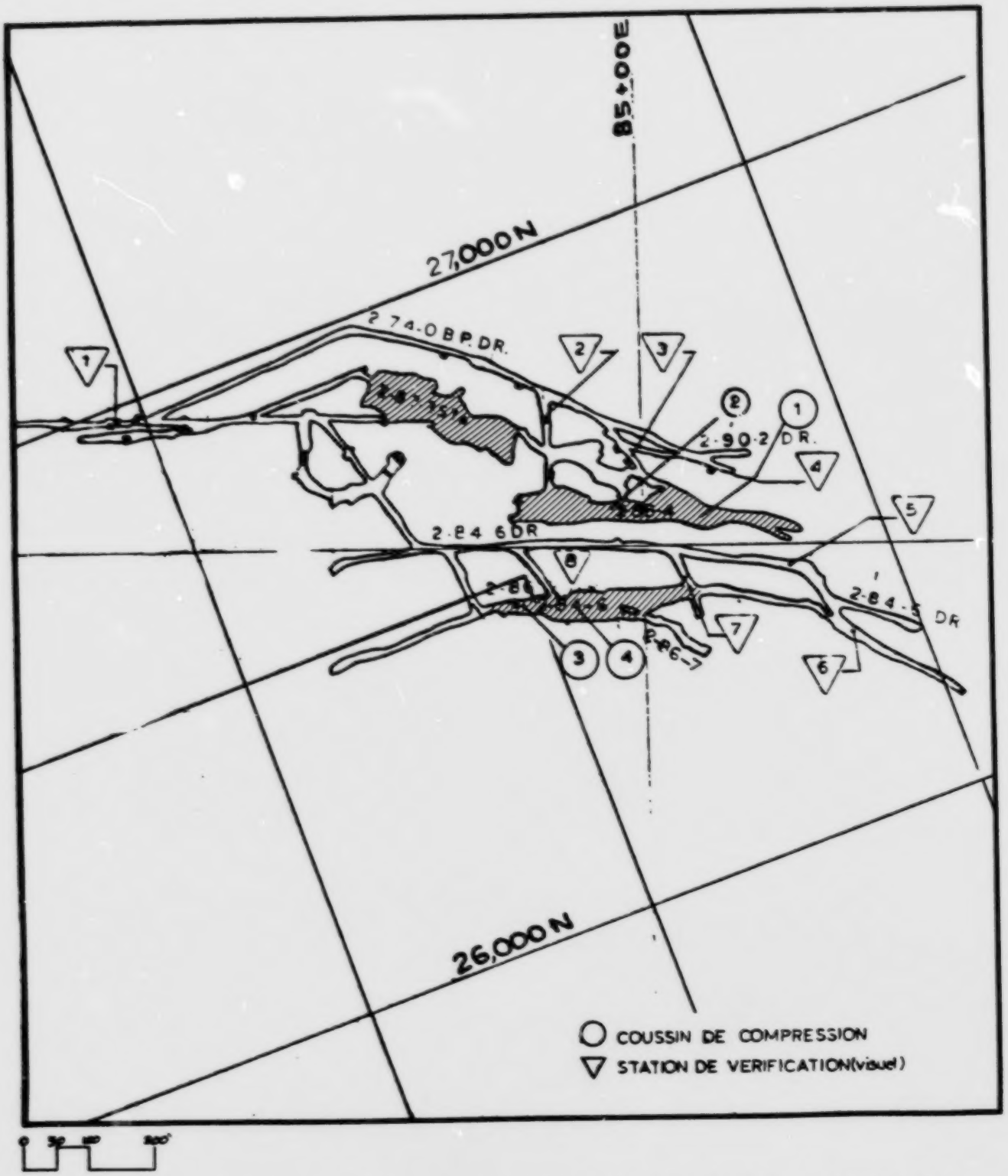


FIG. 2,5 PLAN D'INSPECTION ILLUSTRANT LES STATIONS DE VÉRIFICATIONS ET LES PILIERS DE SURFACE MUNIS DE COUSSINS DE COMPRESSION.

TABLEAU 2.1: DIMENSIONS DE PILIERS DE SURFACE ET CHANTIERS SOUS-JACENTS

	EXEMPLES						
PILIERS DE SURFACE	≠1	≠2	≠3	≠4	≠5	≠6	≠7
MORT-TERRAIN:							
- Epaisseur (m)	3	5	6	6	5	7	3
PILIERS DE SURFACE:							
- Epaisseur (m)	59	49	49	49	58	17	56
CHANTIERS:							
- Longueur (m)	61	46	61	107	76	84	79
- Largeur (m)	5	21	9	9	12	5	6
- Hauteur (m)	46	46	46	43	40	55	50
REMARQUES:							
LAC EN SURFACE							
- Epaisseur (m)	1	12	11	11	12	-	2
RESIDUS EN SURFACE							
- Epaisseur (m)	-	-	-	-	-	2	-

couvre ces piliers de surface et au-dessus du mort-terrain on retrouve une couche d'eau ou des résidus de mines saturés par les eaux d'un lac situé à proximité du parc à résidus.

2.4.8 Evaluation du massif rocheux

Une étude commandée en 1981 par la direction avait comme objectifs de passer en revue et de comparer diverses méthodes d'évaluation des conditions locales de stabilité adaptées aux petites exploitations souterraines, et par la suite de développer des procédures internes pour évaluer d'une manière continuelle la stabilité des sites. Cette étude n'est pas encore complétée mais une copie du rapport décrivant les premières étapes franchies dans cette étude nous a été remise par la direction de la mine. La méthodologie suivie dans ces étapes se résume à ceci:

i - développer un système d'enregistrement des données concernant la stabilité des chantiers (rapport du contremaître mentionné à la section 2.4.4);

ii - considérer et évaluer l'implication de données structurales et géotechniques additionnelles dans les plans et sections de la mine (description des carottes de forage, R.Q.D., indice de poinçonnement, analyses stéréographiques...);

iii- déterminer si les systèmes actuels de classification des massifs rocheux peuvent être applicables selon les conditions locales rencontrées dans la mine (description, avantages et inconvénients des classifications "NGI" et "CSIR": "Norwegian Geotechnical Institute" et "Council for Scientific and Industrial Research").

Le point "i" correspond aux informations recueillies par les contremaîtres responsables des chantiers souterrains, telles que décrites dans la figure 2.4. Cette façon de procéder permet de déceler et d'évaluer les changements des conditions de stabilité dans les chantiers et aussi d'accroître le degré de sensibilisation de la direction et de tout le personnel minier face à ces conditions.

Le second point abordé par l'étude concerne l'intégration de données additionnelles dans les plans miniers, telles le R.Q.D. ou l'indice de poinçonnement, ce qui doit aider à mieux définir le massif et à concevoir d'une manière plus réaliste les plans miniers. Les auteurs notent que dans le cas de l'essai de poinçonnement, les valeurs ou les indices découlant de cet essai peuvent servir à évaluer la résistance en compression uniaxiale de la roche à l'aide des formules suivantes:

$$Sc = (14 + 0{,}175\ D)\ I_s \qquad \text{(Bieniawski, 1975)}$$

où Sc = résistance en compression uniaxiale (estimée)
D = diamètre de l'échantillon (carotte de forage)
I_s = indice de poinçonnement

$$I_s = \frac{P \text{ (charge appliquée pour casser l'échantillon)}}{D^2 \text{ (diamètre de l'échantillon)}}$$

Les dimensions des échantillons de carottes servant à l'essai de poinçonnement doivent respecter la condition suivante:

$$\frac{\text{longueur de l'échantillon}}{\text{diamètre de l'échantillon}} \geq 1{,}5$$

Afin de mieux comparer la qualité de la roche d'un point à un autre d'un massif rocheux, des systèmes de classification basés sur des pointages alloués à des paramètres influençant le comportement de la roche sont utilisés de plus en plus par les compagnies minières. Ceci permet de définir des zones potentiellement instables et facilite la conception des plans miniers. Dans le troisième point de l'étude, deux classifications, l'une développée en Afrique du Sud (CSIR) et l'autre en Norvège (NGI), sont utilisées en parallèle par les auteurs qui les considèrent comme étant assez évoluées et bien adaptées pour caractériser les types de roches que l'on rencontre au Canada. Ces deux classifications s'appuient chacune sur un ensemble de paramètres tel qu'énumérés au tableau 2.2.

Dans la classification "CSIR", la qualité du massif rocheux est obtenue par l'addition des pointages alloués à chacun des cinq (5) paramètres, alors que dans la classification "NGI", la qualité du massif rocheux est calculée comme suit:

$$Q \text{ (qualité du massif rocheux)} = \frac{RQD}{Jn} \times \frac{Jr}{Ja} \times \frac{Jw}{SRF}$$

TABLEAU 2.2 : PARAMETRES UTILISES DANS LES CLASSIFICATIONS "CSIR" ET "NGI"

Classification "CSIR"	Classification "NGI"
1) Résistance en compression uniaxiale (peut être estimée à partir de l'indice de poinçonnement)	1) R.Q.D.
2) R.Q.D.	2) Nombre de joints = Jn
3) Espacement entre les joints	3) Rugosité des joints = Jr
4) Conditions des joints	4) Altération des joints = Ja
5) Conditions hydrologiques	5) Conditions hydrologiques = Jw
	6) Facteur de réduction de contraintes = SRF

La classification "CSIR" a l'inconvénient d'exiger un essai (résistance en compression uniaxiale) pour désigner la qualité de la roche. A défaut de cet essai, on peut approximer la résistance en compression uniaxiale avec la formule de Bieniawski (1975) et l'indice de poinçonnement ci-haut mentionnés. Les quatre autres paramètres découlent d'observations visuelles de la roche.

Cependant, la classification "NGI" ne requiert aucun essai mais exige une bonne familiarisation avec la description des joints. Une fois cette étape franchie, l'application de cette méthode devient facile, selon les auteurs du rapport.

En l'absence du R.Q.D., cette valeur est évaluée à partir de la formule empirique donnée par Hoek et Brown (1980), soit:

$$R.Q.D. \simeq 115 - 3{,}3\ jV$$

où jV = nombre de joints par m^3

Dans la mine visitée, les auteurs ont étudié et classé plus de 150 échantillons ou sites à l'aide des classifications "CSIR" et "NGI". La corrélation entre les deux valeurs obtenues par chacune d'elle est plus ou moins forte ($r = 0{,}74$). La relation d'équivalence trouvée par régression linéaire est:

$$\text{"CSIR"} = 50{,}81 + 12{,}11 \log \text{"NGI"}$$

Les auteurs du rapport concluent que l'addition de données structurales et géotechniques (description des roches...) dans les plans et sections contribuera grandement à la compréhension du comportement du massif rocheux et que cette procédure n'entraînerait que des déboursés supplémentaires relativement faibles. Ils estiment que la classification "NGI" serait plus facile à intégrer dans les travaux de reconnaissance du massif, surtout parce qu'il n'y a pas d'essais à effectuer. Après avoir effectué 168 essais de résistance en compression uniaxiale, les auteurs estiment qu'il existe une relation entre cette résistance et la classification développée par les géologues de la compagnie. Cette classification subdivise les roches caractérisant la mine en neuf groupes qui présentent un degré d'altération croissant avec les numéros de groupe.

2.4.9 Divers

Depuis quelques années, la direction a entrepris une étude des piliers de surface. Cette étude comprend une cartographie, un relevé d'arpentage, des sections et des plans détaillés des piliers en question. Ces travaux permettent un suivi de la situation et, avec les tournées d'inspection, assurent la sécurité des travailleurs. Les figures 2.6 et 2.7 montrent quelques piliers de surface ainsi que les chantiers sous-jacents.

Un fait intéressant concernant l'exploitation d'un pilier de surface mérite d'être mentionné. Durant l'exploitation d'un pilier de surface d'environ 40 m d'épaisseur, une détérioration du toit s'effectua en quelques heures et forma une che-

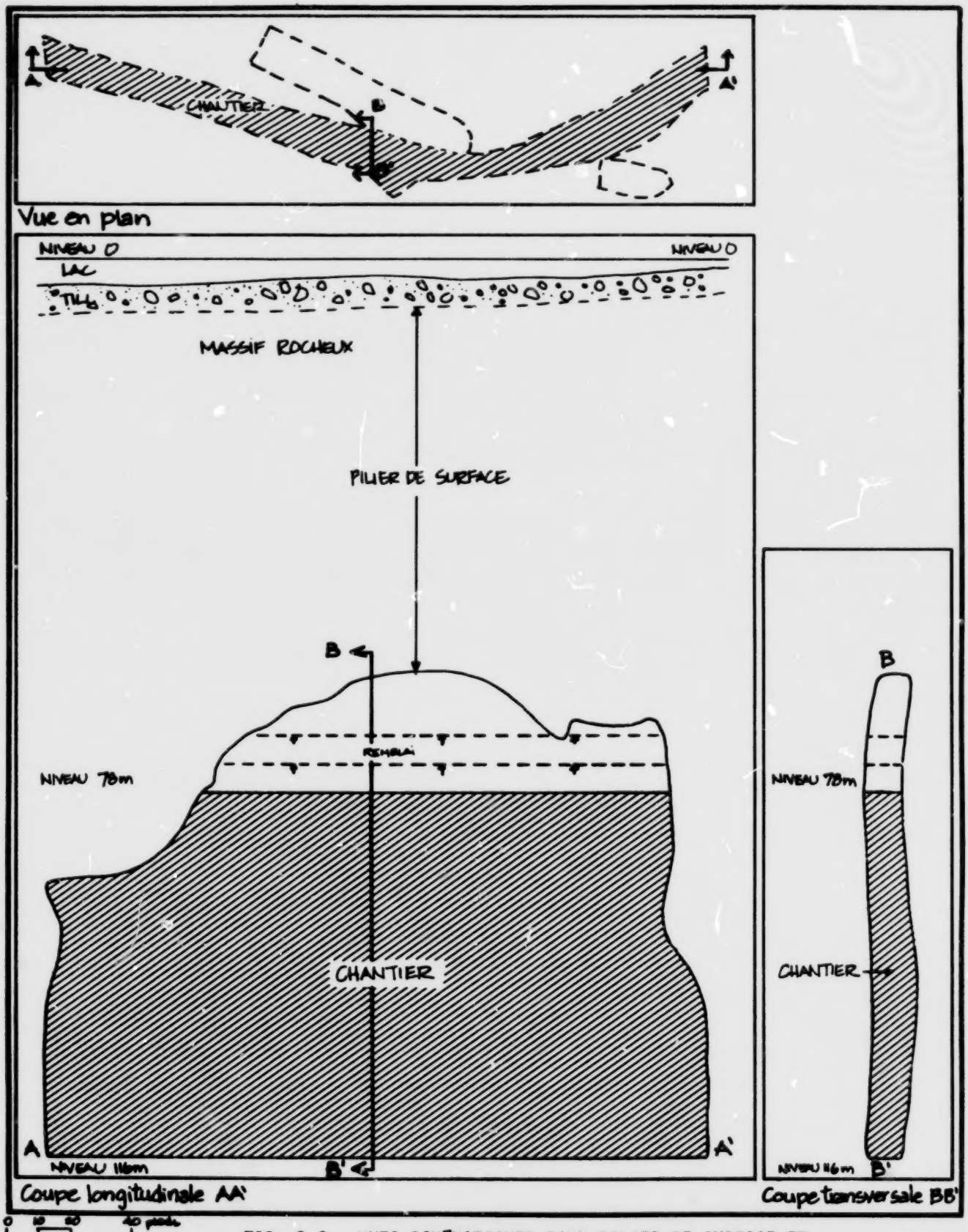


FIG. 2.6 VUES SCHÉMATIQUES D'UN PILIER DE SURFACE ET DU CHANTIER SOUS-JACENT

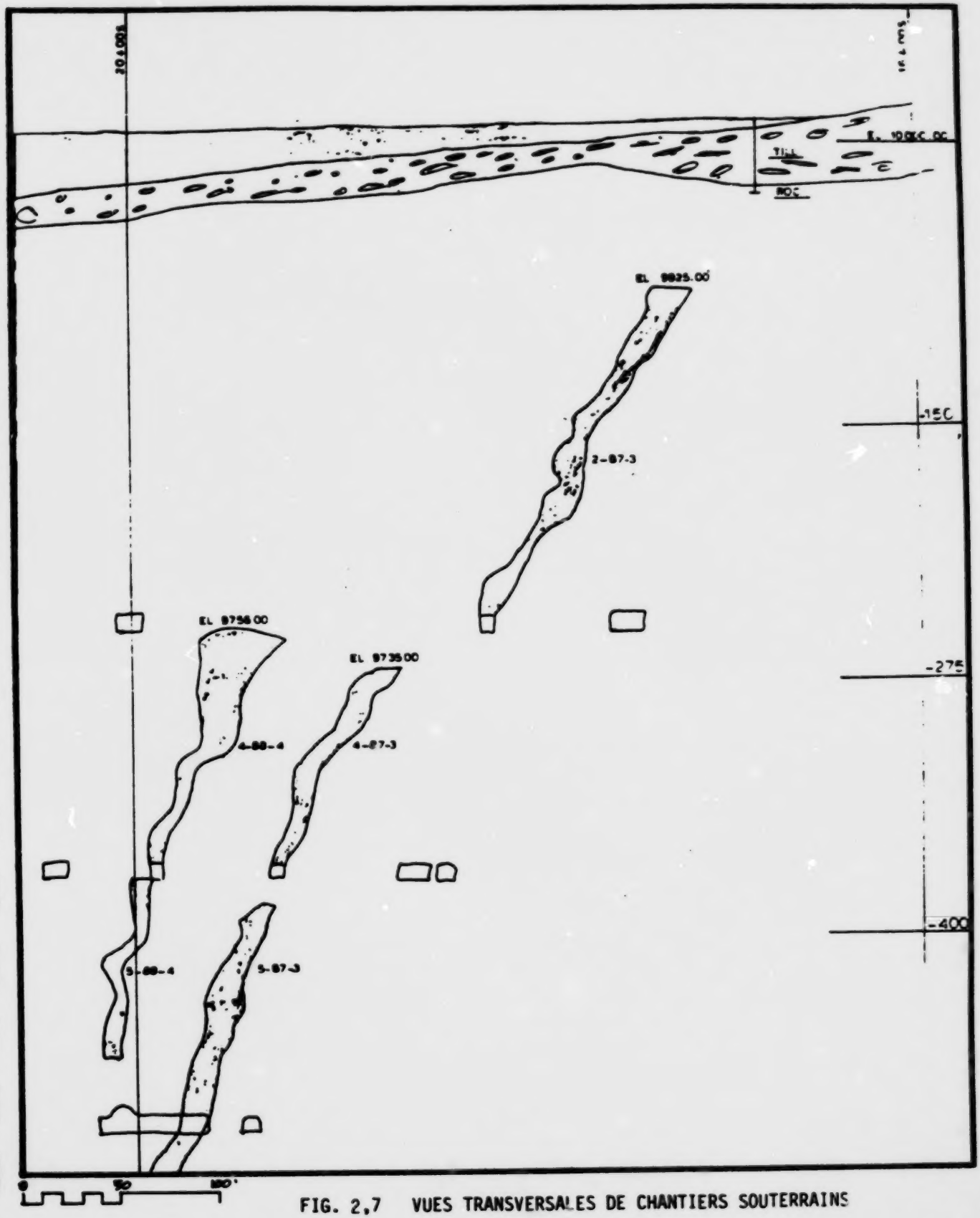


FIG. 2,7 VUES TRANSVERSALES DE CHANTIERS SOUTERRAINS

minée d'environ 18 m de hauteur et 3 m de diamètre (figure 2.8). Le chantier fut remblayé et fermé aussitôt après avoir rempli et colmaté cette cheminée avec du ciment et des structures en bois. Le toit du chantier a été solidifié avec des boulons résinés. Les causes de cet effondrement furent la faible qualité du massif rocheux qui présentait à cet endroit des zones de délavement et la présence de deux failles locales qui ont gouverné le volume d'effondrement.

2.5 BILAN DE LA VISITE

Au début de l'exploitation des dépôts, la philosophie d'approche de la direction face aux piliers de surface était simple: l'épaisseur des piliers de surface était fixée arbitrairement, d'une façon intuitive et conservatrice. Dès que les chantiers atteignaient les hauteurs désignées, l'exploitation des piliers de surface s'effectuait avec beaucoup plus d'attention et un suivi plus continu des réactions des piliers de surface.

La direction minière entreprenait très tôt dans le développement d'un gisement une action importante (injection de béton dans les trous de forage) pour augmenter la qualité du massif rocheux dans l'éponte supérieure et diminuer l'infiltration des eaux de surface. Cette décision était liée étroitement à la présence d'eau en surface. A cette époque, les autorités minières prévoyaient déjà par expérience les problèmes susceptibles de survenir durant l'exploitation des dépôts et, sans qu'il y ait de programme de mécanique des roches, les informations pertinentes concernant l'aspect structural du

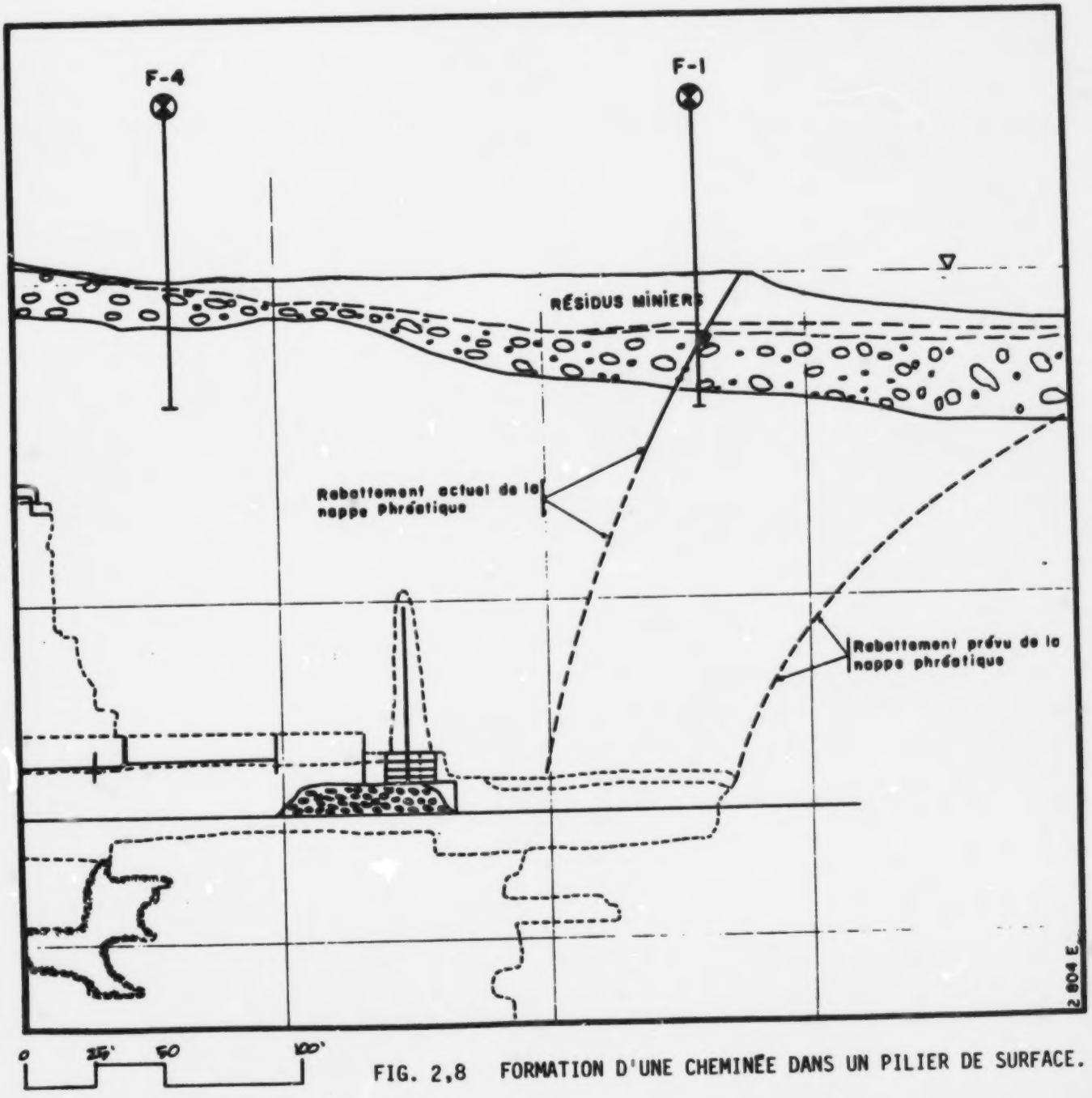


FIG. 2,8 FORMATION D'UNE CHEMINÉE DANS UN PILIER DE SURFACE.

massif rocheux étaient compilées soigneusement par les géologues et interprétées pour permettre une conception plus réaliste des futures mines. Le rôle joué par les géologues était et est encore de première importance dans la conception des piliers de surface. En effet, les données géologiques englobent non seulement la teneur, la minéralogie et la cartographie des zones minéralisées, mais également les discontinuités et les facteurs qui peuvent influencer la stabilité du massif rocheux.

Des études ont démontré que le massif rocheux recouvrant les chantiers supérieurs montrent une composition hétérogène où des zones de roches dures s'entremêlent avec du minerai et des zones de roches délavées à texture terreuse. Des minéraux secondaires et une faible compétence caractérisent ces dernières zones.

La visite périodique des chantiers sous-jacents aux piliers de surface et la lecture des cellules de chargement sont devenues des routines bien établies. De plus, la direction s'est engagée dans un programme touchant la mécanique des roches et la stabilité des chantiers. Les dirigeants tentent de sensibiliser tous les intervenants en appliquant des mesures concrètes telles l'implication des contremaîtres dans l'évaluation de la stabilité de leur propre chantier ou encore la cartographie des discontinuités dans les galeries.

MINE NO 3

MINES DE CUIVRE, OR ET ARGENT: ABATTAGE PAR TROUS DE MINE, COUPE ET REMBLAI

TABLE DES MATIERES

PAGE

3.0 MINE DE CUIVRE, OR ET ARGENT: ABATTAGE PAR TROUS DE MINE, COUPE ET REMBLAI 219

3.1 BREF HISTORIQUE DE LA MINE 219
3.2 METHODE DE MINAGE 220
3.3 TERMINOLOGIE UTILISEE 222
3.4 ELEMENTS DE CONCEPTION DU/DES PILIERS DE SURFACE 223

3.4.1 Etude des conditions d'eau 223
3.4.2 Sols au-dessus de la zone minéralisée 223
3.4.3 Modélisation de la mine 225
3.4.4 Mécanique des roches 229
3.4.5 Soutènement 230
3.4.6 Instrumentation/modes de contrôle 230
3.4.7 Géométrie des piliers de surface 233
3.4.8 Evaluation du massif rocheux 233
3.4.9 Divers 235

3.5 BILAN DE LA VISITE 236

MINE NO 3

3.0 MINES DE CUIVRE, OR ET ARGENT: ABATTAGE PAR TROUS DE MINE, COUPE ET REMBLAI

3.1 BREF HISTORIQUE DE LA MINE

Le gisement a été découvert durant les années vingt et le premier puits fut creusé au cours des années trente. Pour des raisons économiques, la mine fut fermée après seulement deux années d'activité et ce n'est qu'au début des années cinquante que la production débuta. Le gisement est alors exploité en trois zones différentes. Depuis douze ans, le nombre de tonnes métriques de minerais traités annuellement oscille autour de 1 000 000.

Le gisement se divise en une série de veines contenant du quartz et de la chalcopyrite localisées dans des systèmes de fractures, au sein d'un sill mafique et ultramafique fortement faillé et plissé. Le sill est d'âge archéen et se différencie en un gabbro et une pyroxénite. Le gabbro contient environ 75% de la minéralisation et la pyroxénite environ 25%.

Les veines de minerai ont de 30 à 300 m de longueur, de 1 à 6 m de largeur et 30 à 730 m de profondeur. Le pendage des veines varie entre 55 et 70°.

Les niveaux d'exploitation sont distancés généralement de 50 m et les sous-niveaux de 18 m. Les infrastructures souterraines atteignent - 1 012 m de profondeur.

3.2 METHODES DE MINAGE

La plupart du minerai est actuellement exploité selon la méthode des longs trous (trous de mine). Les méthodes chambres-magasin et coupe et remblai sont également utilisées. Le minerai est sorti par trois puits d'extraction.

Les dimensions des chantiers d'abattage suivent celles des veines minéralisées. Dans les chantiers d'abattage par longs trous, le développement commence avec une monterie de service de 1,8 m x 2,4 m à une extrémité. Les galeries de sous-niveaux sont perçées à partir des monteries de service. Dans le cas des veines de faible largeur (< 8 m), la galerie de sous-niveaux est prise en coupe de parement à pleine largeur pour le forage de la banquette et dans le cas des veines plus larges, des galeries de contour sont perçées dans les épontes supérieures et inférieures pour permettre l'abattage en vrac. La figure 3.1 illustre un chantier d'abattage par longs trous. On remarquera dans cette figure les barres d'acier armé qui sont installées dans un coin de galerie où les contraintes se concentrent. Pour un meilleur contrôle de la stabilité des chantiers, des piliers sont laissés pour séparer les épontes inférieures et supérieures.

L'abattage par chambres-magasin est la deuxième méthode la plus utilisée. Le minerai est extrait par tranches horizontales, partant du bas vers le haut. Une partie du minerai cassé est laissé dans le chantier et sert de plate-forme pour miner le minerai situé au-dessus. Le minerai laissé dans le chantier aide également à supporter les murs.

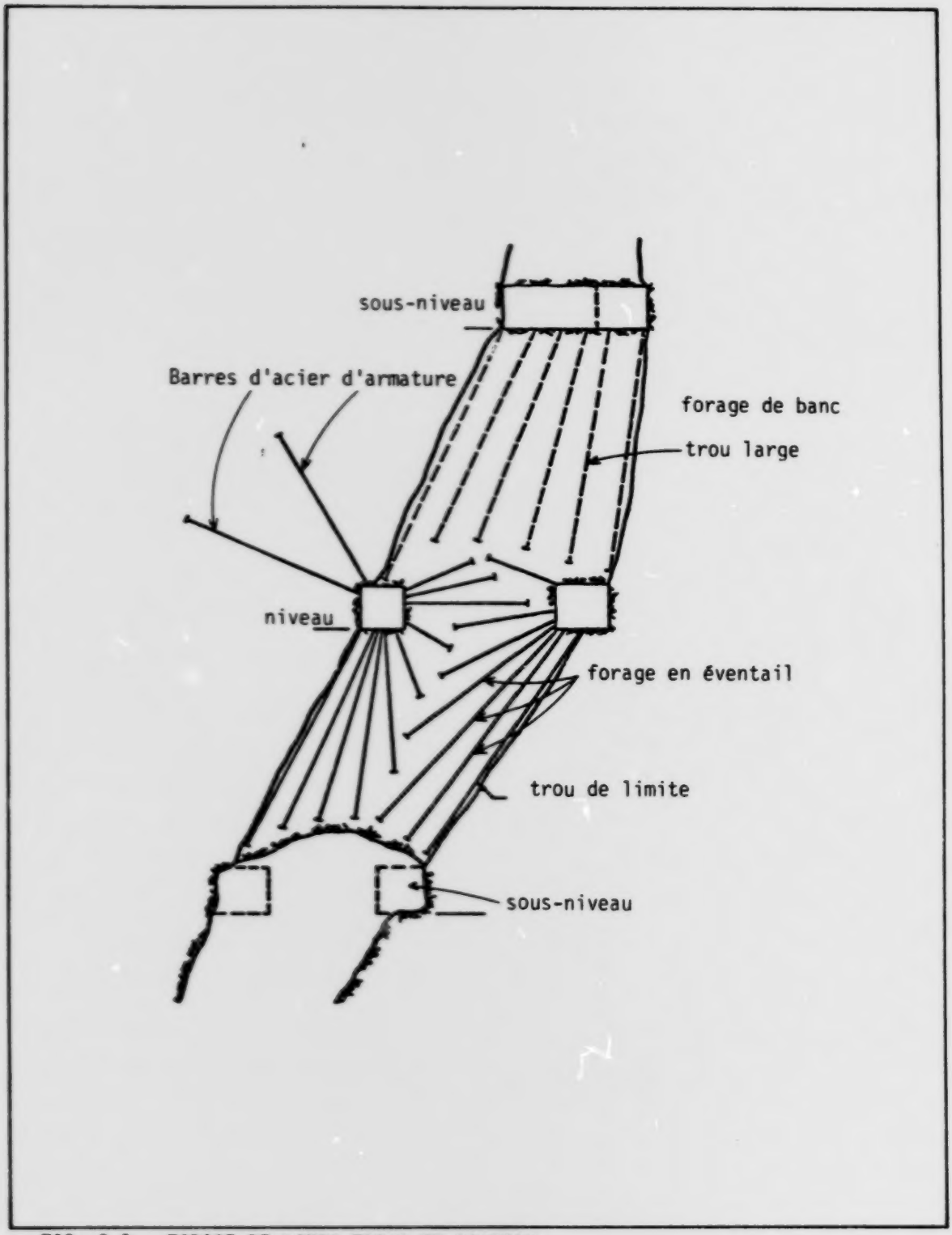


FIG. 3.1 FORAGE DE LONGS TROUS ET SAUTAGE

La méthode coupe et remblai consiste à percer des galeries d'avancement dans le filon et prendre des coupes de parement à la largeur de la veine, lorsque celle-ci est étroite, et, dans le cas des veines plus larges, une galerie est creusée dans l'éponte inférieure pour le transport du minerai. Cette dernière procédure s'avère plus économique, plus pratique et les écaillements de roches sont moins fréquents. Le remblayage des chantiers assure une meilleure stabilité du roc et empêche l'écaillage des parois ainsi recouvertes.

Des filons-couches situés sous des vieux chantiers de coupe et remblai sont récupérés par tranche verticale et de soutènement par cadre. Les parties exploitées sont remblayées par un mélange résidus de mine-ciment suivant la proportion 30:1.

3.3 TERMINOLOGIE UTILISEE

Les termes piliers permanents, piliers de surface, piliers de couronne, piliers et stots sont pratiquement les seuls utilisés par la direction. Dans les chantiers longs et profonds, on rencontre les piliers permanents qui assument la stabilité des parois et planchers en réunissant les épontes supérieures et inférieures. Les termes piliers de surface, piliers de couronne et stots réfèrent au socle rocheux séparant le mort-terrain des chantiers supérieurs de la mine. Le terme pilier est le plus couramment utilisé et peut désigner aussi bien le pilier de couronne que le pilier de séparation.

3.4 ELEMENTS DE CONCEPTION DU/DES PILIERS DE SURFACE

3.4.1 Etude des conditions d'eau

Les entrées d'eau souterraines au niveau des chantiers d'exploitation sont facilement contrôlées par des systèmes de pompage adéquatement installés aux endroits stratégiques et le niveau d'eau dans le mort-terrain est suivi grâce à des piézomètres installés dans des trous de sondage.

Un nouveau gisement actuellement en développement a fait dernièrement l'objet d'une étude technique détaillée. Malheureusement, le rapport technique n'était pas disponible. Un résumé de cette étude nous permet cependant de dire qu'une étude hydrologique a été menée à terme. Cette étude s'appuie sur des sondages dans le mort-terrain et le roc, des essais de perméabilité et diverses données de terrain. Les conclusions de cette étude ont servi de guide dans l'élaboration du système de pompage.

3.4.2 Sols au-dessus de la zone minéralisée

Des études économiques et techniques sont effectuées lorsque le mort-terrain constitue un danger potentiel pour des chantiers situés près du contact mort-terrain-socle rocheux. Des trous de sondage sont souvent exécutés pour déterminer l'épaisseur du mort-terrain (figure 3.2). Le mort-terrain est alors enlevé entièrement lorsqu'il présente une faible épaisseur ou asséché pour réduire les possibilités d'écoulement lorsqu'il devient trop épais pour être extrait d'une manière rentable.

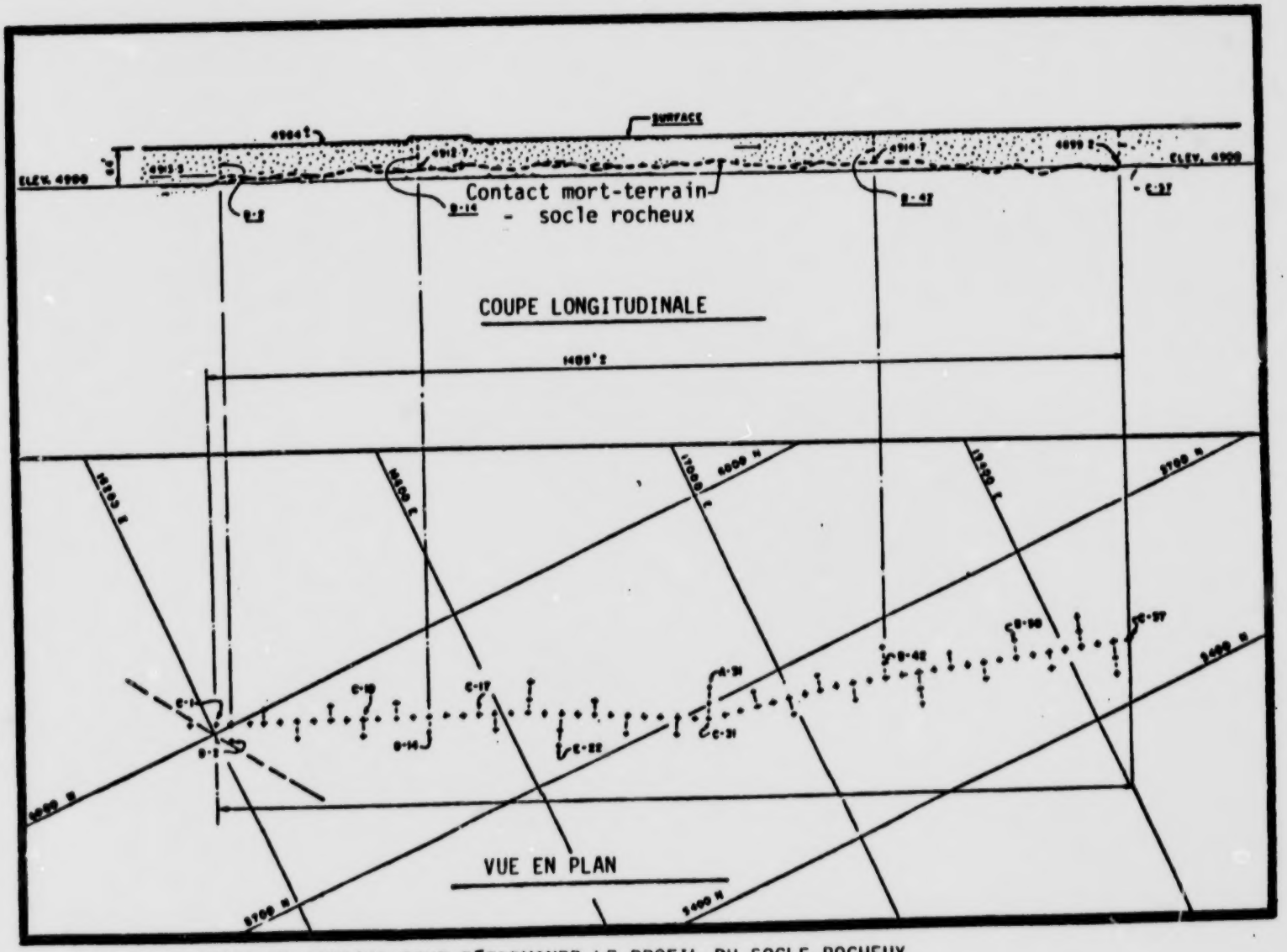


FIG. 3.2 TROUS DE SONDAGE POUR DÉTERMINER LE PROFIL DU SOCLE ROCHEUX.

Dans un cas particulier, une étude commandée par la direction passe en revue les problèmes associés à la présence de mort-terrain saturé d'eau situé au-dessus d'un pilier de surface destiné à être exploité partiellement. Un résumé de cette étude mentionne les divers tests effectués dans le mort-terrain. Des analyses granulométriques et chimiques exécutées sur des échantillons donnent un sol sablo-silteux de faible cohésion et des sondages espacés aux 25 pieds ont permis d'obtenir la topographie du socle rocheux. Ces sondages n'indiquent aucune cuvette importante où l'eau pourrait produire une pression hydrostatique importante. Par contre, la faible cohésion du sol saturé d'eau a motivé la direction à suivre certaines précautions qui sont détaillées plus loin dans la section 3.4.6 (instrumentation/modes de contrôle).

Un fait intéressant à noter est que l'étude recommande d'obtenir des informations additionnelles sur la topographie du socle rocheux jusqu'à 30 m de part et d'autre des épontes inférieures et supérieures, pour s'assurer qu'aucune dépression importante ne vienne modifier la distribution des contraintes calculées au début.

3.4.3 Modélisation de la mine

Des modèles numériques ont été appliqués dans l'étude de la stabilité des piliers, incluant les piliers de surface. Les contraintes et les déplacements ont été déterminés en utilisant la méthode par éléments finis. Nous avons obtenu de la part de la direction de la mine un résumé des hypothèses de base et des conclusions découlant de l'étude de l'un de ces modèles. Ce dernier s'applique à un pilier de surface que la direction voulait exploiter partiellement.

La veine minéralisée était déjà exploitée jusqu'à 55 m sous la surface. Le contact entre le roc et le mort-terrain se situait approximativement à 15 m, ce qui laissait 40 m de roc au-dessus du chantier actuel. Dans ce secteur, la veine avait entre 2 m et 3 m de largeur et quelque 150 m de longueur. L'étude dont nous parlons avait pour but de déterminer l'épaisseur requise du pilier de surface sous de telles conditions.

Elle comportait essentiellement trois phases, soient:

1- La collecte des données de base
2- L'analyse et l'évaluation de la stabilité
3- Les critères de conception du futur pilier

Les données de base nécessaires à cette étude se composaient des éléments suivants:

i) évaluation du sol surplombant la zone étudiée
ii) résistance et structure du massif rocheux impliqué
iii) interprétation de la géologie locale
iv) facteurs reliés à l'exploitation

La cueillette des informations de base s'est effectuée sur place et en laboratoire, au-dessus et de part et d'autre du futur pilier. Tel que décrit précédemment à la section 3.4.2, la nature et la profondeur du mort-terrain ont été étudiées en détails à l'aide de forages entrepris à partir de la surface. Les données structurales provenaient de la mise

en plans des niveaux inférieurs déjà exploités ainsi que de l'analyse de certaines carottes de forage disponibles. Enfin, les propriétés géomécaniques des divers types de roche provenaient d'essais en laboratoire effectués sur des échantillons représentatifs de roche.

La seconde phase du projet consistait à évaluer toutes ces informations afin d'en dégager les éléments requis pour la conception du pilier de surface. C'est à ce stade de l'étude que nous retrouvons l'utilisation du modèle numérique dans lequel la méthode d'analyse par éléments finis avait pour but de déterminer les contraintes et déplacements à l'intérieur et autour du futur pilier. Les données utilisées pour cette simulation s'appliquaient à (4) groupes de roches, soient: la zone minéralisée, le massif environnant, les zones majeures de cisaillement ainsi que le mort-terrain. Chaque groupe était défini par les paramètres couramment utilisés dans ce type d'analyse, soient: la résistance en compression uniaxiale, la résistance en tension, la cohésion, l'angle de friction interne, la densité de la roche, son module d'élasticité ainsi que le rapport de Poisson.

Sans pouvoir élaborer sur la façon dont l'analyse a été faite, nous pouvons mentionner que la valeur de la résistance en compression simple utilisée dans le modèle pour définir la roche du gisement et celle du massif environnant était égale à 21% de la moyenne des valeurs de laboratoire obtenue à partir d'échantillons. Dans le cas de la valeur utilisée à l'intérieur des zones de cisaillement, la résistance était diminuée à 5% de celle des résultats de laboratoire.

Soulignons également que le facteur de sécurité déterminé dans cette étude était calculé par le rapport de la moyenne de la résistance (en compression uniaxiale) du massif utilisé sur la contrainte maximum devant agir au centre du pilier de surface, obtenue des calculs.

Cette modélisation a été faite en fonction de l'utilisation de la méthode de minage par chambres-magasins pour des largeurs de 2 m à 3 m en considérant les chantiers sous-jacents au niveau -55 m comme complètement vides et d'une largeur de 4 m.

La somme impressionnante d'informations qui a été recueillie et traitée a permis de dégager des éléments de conception importants. La principale conclusion de l'étude est que dans ce cas, selon les hypothèses retenues, il est possible de poursuivre le minage au-delà du niveau -55 m jusqu'à l'élévation -27 m, ce qui laisse un pilier de surface minimum de 12 m d'épaisseur ou de 5 fois la largeur des chantiers non remblayés. L'étude conclue à la stabilité à long terme de ce pilier et fournit des appréciations générales sur les points de conception suivants:

i) entre autre chose, que le sol est complètement saturé, de faible cohésion et constitué de sable fin et de silt; qu'il faut porter une attention particulière aux vibrations causées par les sautages;

ii) la structure de la masse rocheuse est telle qu'elle divise le massif en blocs unitaires nécessitant l'utilisation de support artificiel;

iii) la présence d'eau dans la masse rocheuse doit être considérée mais ne présentera pas de problèmes sérieux à cause de l'effet de relâchement des joints qui devra augmenter son drainage;

iv) l'étude a démontré la sensibilité de la stabilité du pilier de surface en fonction de la variation de son épaisseur. Elle fait clairement ressortir les zones potentielles de fracturation et fournit une appréciation sur les déplacements maximums prévus du pilier recommandé. Elle situe le facteur de sécurité (selon la définition déjà expliquée) à plus de 8 et fournit une appréciation sur l'effet qu'aurait le remblayage des chantiers sur l'épaisseur du pilier. Dans ce cas, l'auteur suggère qu'une réduction de 50% de l'épaisseur serait possible.

v) l'auteur mentionne enfin que la surveillance du pilier est essentielle une fois l'exploitation complétée. Il recommande donc l'installation d'instruments de mesure ainsi qu'une inspection visuelle des ouvertures.

3.4.4 Mécanique des roches

Les travaux de mécanique des roches sont habituellement fait par des consultants extérieurs. La direction ne possède pas de département de mécanique des roches comme tel, mais intègre plutôt, lorsqu'il s'agit d'études mineures, ces travaux parmi ceux habituellement exécutés par les ingénieurs travaillant au département de la planification. Ces derniers décident du patron de boulonnage, des endroits où des câbles et divers appareils de prévention (extensomètres, cellules de chargement...) doivent être installés.

Le tableau 3.1 illustre quelques propriétés d'échantillons de roches prélevés dans le gisement et dans les épontes supérieures et inférieures. La résistance en compression uniaxiale est relativement élevée avec des valeurs de 139 et 154 MPa (20 200 et 22 200 psi).

3.4.5 Soutènement

Tous les chantiers sont systématiquement boulonnés. Des barres d'acier d'armature de 2,5 cm de diamètre sont installés généralement entre 4 et 6 m de distance. Dans le cas où le massif rocheux montre une faible qualité, des câbles et de longs boulons résinés sont installés. Dans le cas des piliers de surface, la compagnie utilise le patron de boulonnage suivant: une barre d'acier (20 mm de diamètre par 2,1 m de longueur) cimentée à chaque mètre carré de surface exposé sous le pilier, et ce de façon systématique.

Les chantiers sont habituellement remblayés pour assurer une meilleure stabilité des murs et toits. Ils sont divisés en deux parties par un pilier utilisé pour retenir le remblayage: celui-ci est constitué d'un mélange roches stériles/remblai hydraulique suivant la proportion de 6: 1. Tel que mentionné à la section 3.2, certains chantiers peuvent être remblayés par un mélange résidus de mine/ciment.

3.4.6 Instrumentation/modes de contrôle

Le contrôle de la stabilité des piliers de surface est assuré par des tournées d'inspection et des trous de sondages servent à surveiller les parties de chantiers qui ne sont pas

TABLEAU 3.1: PROPRIETES DES ROCHES

SITE DE PRELEVEMENT	RESISTANCE EN COMPRESSION UNIAXIALE MPa	MODULE D'ELASTICITE E, MPa	POIDS SPECIFIQUE KN/m^3	NOMBRE D'ECHANTILLONS
Eponte supérieure	139	$1,02 \times 10^5$	28,7	3
Eponte inférieure	154	$0,96 \times 10^5$	29,2	3
Gisement	139	$0,87 \times 10^5$	29,5	4

situées sous une galerie accessible. Ces trous sont remplis d'eau jusqu'au collet: si le trou ne s'emplit pas c'est alors un indice de la détérioration du terrain. De même, si un des trous de sondage n'est plus accessible sur toute sa longueur cela pourrait signifier un mouvement dans le massif.

Au cours de l'exploitation, la fréquence des visites est d'une par semaine et cette fréquence devient mensuelle deux mois après l'arrêt de l'abattage. La fréquence des visites durant le soutirage est d'une par deux semaines et par la suite une par mois. Toute situation qui semble anormale est indiquée dans un registre; ainsi à titre d'exemple, un nouvel écoulement d'eau ou encore la formation de fissures apparentes sera consigné par le préposé à l'inspection des chantiers. Ce dernier, habituellement l'ingénieur en planification, commente, date l'événement et assure le suivi de l'inspection.

Certaines mesures de prévention méritent d'être soulignées. Un chantier terminé a été isolé du reste de la mine par deux murs de béton armé de 1,4 m d'épaisseur chacun. Ces murs ont été érigés au cas où le pilier de surface cèderait et laisserait entrer le mort-terrain saturé d'eau et surplombé d'un marécage. Un tuyau muni d'une valve traverse une de ces portes et permet la vérification d'une entrée d'eau éventuelle dans ce chantier isolé. Par ailleurs, certaines zones critiques où le massif rocheux présente des faiblesses ou encore certains chantiers présentant des coupes géométriques critiques sont renforcées avec des câbles et des tiges d'acier très longues.

Le remblayage hydraulique des chantiers souterrains entraîne un apport d'eau non négligeable. Le temps de remblayage est limité par la perméabilité des résidus de mines. Le taux d'infiltration de l'eau au travers du matériel est évalué à 15 ou 20 cm par heure. L'assèchement des chambres remblayées est aidée par l'installation de drains verticaux dans les résidus.

3.4.7 Géométrie des piliers de surface

De nombreux piliers de surface caractérisent l'exploitation du gisement. L'épaisseur moyenne de ces piliers est environ 15 m. Le tableau 3.2 donne les dimensions de quelques piliers de surface ainsi que les dimensions des chantiers sous-jacents. Le cas ≠ 3 semble précaire en raison du marécage situé en surface, mais une étude détaillée du mort-terrain et des conditions de surface (volume minime de mort-terrain, d'eau...) laisse dire à la direction que le chantier visé n'est pas considéré comme dangereux. Il est à noter que ce chantier est terminé depuis plusieurs années, ainsi que tous les autres énumérés dans ce tableau.

3.4.8 Evaluation du massif rocheux

Jusqu'à date, aucun programme d'évaluation systématique du massif rocheux n'a été entrepris par la direction. Cependant, pour des cas spéciaux, les ingénieurs à la planification se servent des données géostructurales recueillies dans les galeries et les trous de sondage pour évaluer la compétence de la roche.

TABLEAU 3.2: DIMENSIONS DE PILIERS DE SURFACE ET CHANTIERS SOUS-JACENTS

	EXEMPLES								
PILIERS DE SURFACE	≠1	≠2	≠3	≠4	≠5	≠6	≠7	≠8	≠9
MORT-TERRAIN:									
- Epaisseur (m)	14	3	4	4	-	-	-	-	-
PILIERS DE SURFACE:									
- Epaisseur (m)	8	12	9	14	6	8	9	21	23
CHANTIERS:									
- Longueur (m)	38	61	30	43	-	-	-	-	-
- Largeur (m)	2	15	6	6	4	3	3	5	3
- Hauteur (m)	46	91	107	-	-	-	-	-	-

REMARQUES:

Exemple ≠1: - Chantier isolé par 2 murs de béton
- Marécage en surface

Exemple ≠2: - Mort-terrain enlevé et pilier exploité

Exemple ≠3: - Marécage en surface

Exemple ≠4: - Stérile en surface

Exemple ≠5: - Socle rocheux en surface

Exemple ≠6: - Socle rocheux en surface

Exemple ≠7: - Socle rocheux en surface

Exemple ≠8: - Socle rocheux en surface

Exemple ≠9: - Gravier en surface

Une étude spéciale commandée par la direction et réalisée par une firme de consultants en ingénierie donne une évaluation d'un massif rocheux contenant un gisement en développement. Les seuls renseignements disponibles nous permettent de dire que cette étude est basée sur les descriptions des carottes de forage, l'étude des joints (plus de 3 000) dans différentes sortes de roche, des essais en laboratoire (module d'élasticité, coefficient de Poisson, résistance en compression...) et des modèles numériques. Le rapport de pression des terres Ko variait entre 2,5 et 3 et les mesures de contraintes étaient calculées pour les niveaux -50 m, -150 m et -300 m. La classification utilisée était celle développée par Bieniawski (1974), soit la classification "CSIR". Les valeurs obtenues par cette méthode variait de 57 à 78, avec une moyenne située entre 70 et 75. Ces valeurs désignent un roc de bonne qualité.

3.4.9 Divers

La direction a l'intention d'exploiter en totalité certains piliers de surface, tout comme elle l'a fait par le passé. Les piliers choisis se situent dans un environnement où les conditions de terrain sont facilement contrôlables. La question économique est étudiée en fonction de la nature et du volume du mort-terrain, des résultats des forages et de la qualité du massif.

3.5 BILAN DE LA VISITE

L'approche de la direction face aux divers problèmes reliés à l'exploitation est à la fois dynamique et sécuritaire. La direction réajuste ses procédures de prévention en fonction des réactions du massif rocheux et des nouvelles données géostructurales cumulées au cours des divers travaux miniers. Parfois, la compagnie minière fait exécuter par des consultants extérieurs des études techniques. Celles-ci servent jusqu'à un certain point de guide dans les décisions à prendre au sujet de l'exploitation du gisement. En réalité, c'est à la direction qu'incombe la décision finale d'exploiter le massif de telle ou telle façon. Par exemple, elle fixera un niveau limite supérieure pour l'exploitation d'un pilier de surface, tout en assumant le pourcentage de risque qui s'y rattache. Le degré d'exposition des mineurs face au danger est un des premiers critères dans le choix de la méthode de minage et les séquences d'exploitation.

La direction a soulevé un point intéressant au sujet de certaines normes de sécurité qui lui furent imposées par l'inspecteur de la C.S.S.T. (Commission de la Santé et de la Sécurité au Travail), à savoir l'application des normes suivantes, soit:

Pour chantier remblayé ou chambre et pilier: Epaisseur du pilier de surface $\geq$ 8 x largeur du chantier

Pour chantier non remblayé ou chambre ouverte: Epaisseur du pilier de surface $\geq$ 12 x largeur du chantier

peut s'avérer dans le cas d'un massif intact trop sécuritaire et stériliser ainsi une trop grande quantité de minerai économique, ou encore peut être non sécuritaire avec un massif très altéré, fracturé et saturé d'eau. Ces normes ne tiennent pas compte de la nature et du volume du mort-terrain situé au-dessus du pilier.

Une suggestion venant de la direction du complexe minier visité et qui concerne l'étude de la stabilité des piliers de surface mérite d'être mentionnée. Des analyses à rebours sur des piliers qui se sont effondrés avec ou sans l'intervention directe des opérateurs apporteraient des précisions intéressantes quant aux critères de rupture et aux conditions du massif rocheux. Cependant, le principal handicap dans ce genre d'étude est le manque de données sur les cas déjà rapportés. Pour progresser dans cette voie, les piliers de surface doivent être instrumentés.

MINE NO 4

MINE DE CUIVRE (ZINC, ARGENT): CHAMBRES VIDES POST-REMBLAYEES

TABLE DES MATIERES

PAGE

4.0 MINE DE CUIVRE (ZINC, ARGENT): CHAMBRES VIDES POST-REMBLAYEES 240

4.1 BREF HISTORIQUE DE LA MINE 240
4.2 METHODE DE MINAGE 243
4.3 TERMINOLOGIE UTILISEE 244
4.4 ELEMENTS DE CONCEPTION DU/DES PILIERS DE SURFACE 246

4.4.1 Etude des conditions d'eau 246
4.4.2 Sols au-dessus de la zone minéralisée 248
4.4.3 Modélisation de la mine 253
4.4.4 Mécanique des roches 255
4.4.5 Soutènement 256
4.4.6 Instrumentation/modes de contrôle 257
4.4.7 Géométrie des piliers de surface 257
4.4.8 Evaluation du massif rocheux 258
4.4.9 Divers 260

4.5 BILAN DE LA VISITE 260

MINE NO 4

4.0 MINE DE CUIVRE (ZINC, ARGENT): CHAMBRES VIDES POST-REMBLAYEES

4.1 BREF HISTORIQUE

La découverte de ce gisement remonte à 1974, ce qui est relativement récent. Ce n'est cependant qu'en 1979 que la décision a été prise de débuter l'exploitation. Aujourd'hui cette mine produit 550 000 tonnes par année. Le gisement est localisé dans une séquence de roches rhyclitiques d'origine volcanique. La minéralisation principale est constituée de chalcopyrite, de pyrite et de sphalérite.

L'une des caractéristiques les plus importantes est la présence d'une faille majeure, d'orientation nord-sud et de pendage variant de 45 à 55° vers l'est. Cette faille délimite le contact inférieur du gisement. Ce dernier a une longueur d'environ 500 mètres et une épaisseur comprise entre 15 et 45 mètres. La veine est exploitée jusqu'au niveau -230 mètres environ et suit le pendage de la faille. La figure 4.1 représente d'ailleurs une section typique de ce gisement.

Le dépôt est recouvert d'un lit de mort-terrain dont l'épaisseur peut atteindre 45 mètres. Les dépôts meubles comprennent de la base au sommet, un premier till, un dépôt de sable et gravier et un deuxième till recouvert aussi de sable et gravier. La figure 4.2 illustre la position relative de ces couches de matériaux.

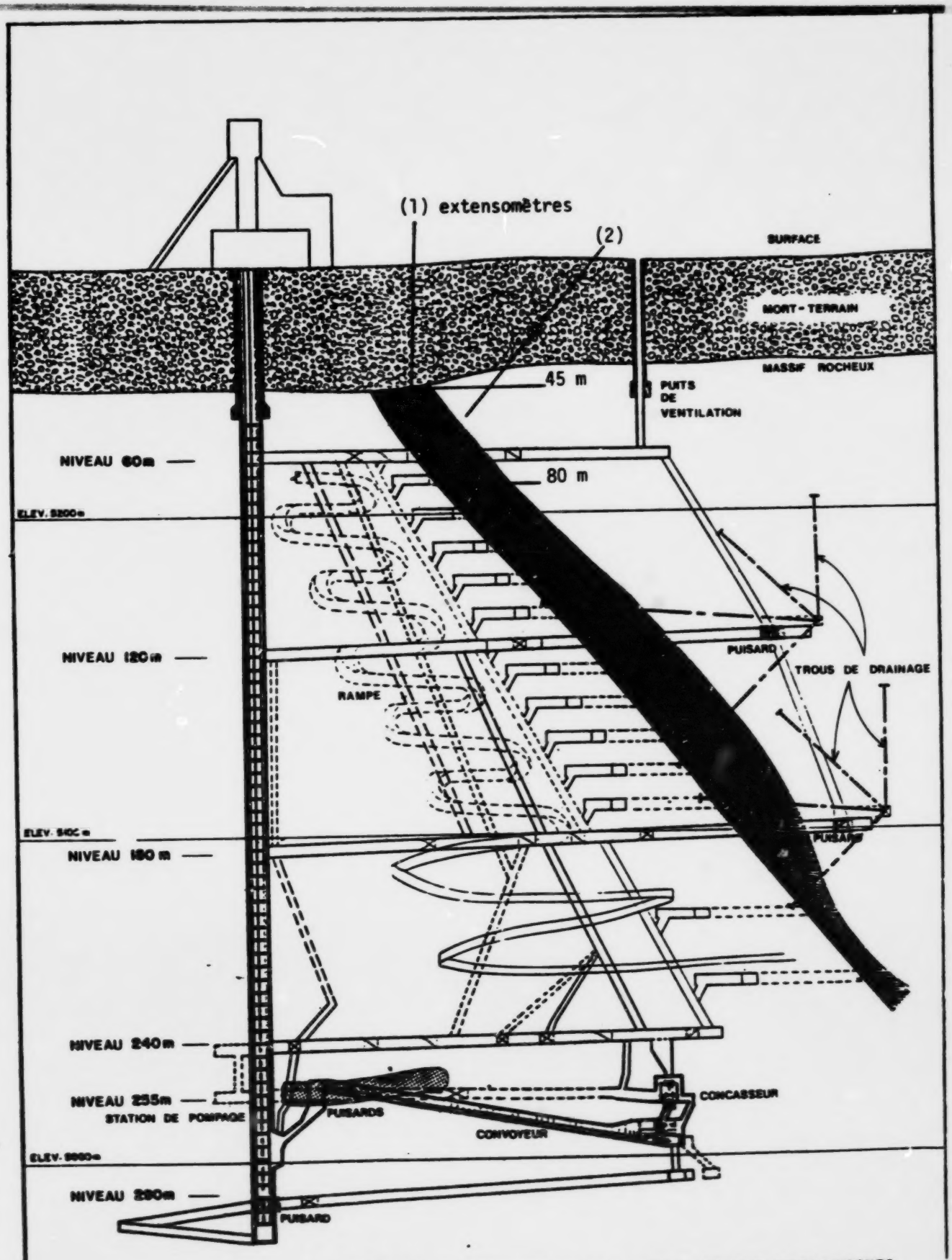


FIG. 4.1 VUE GÉNÉRALE DU GISEMENT ET DES INSTALLATIONS SOUTERRAINES

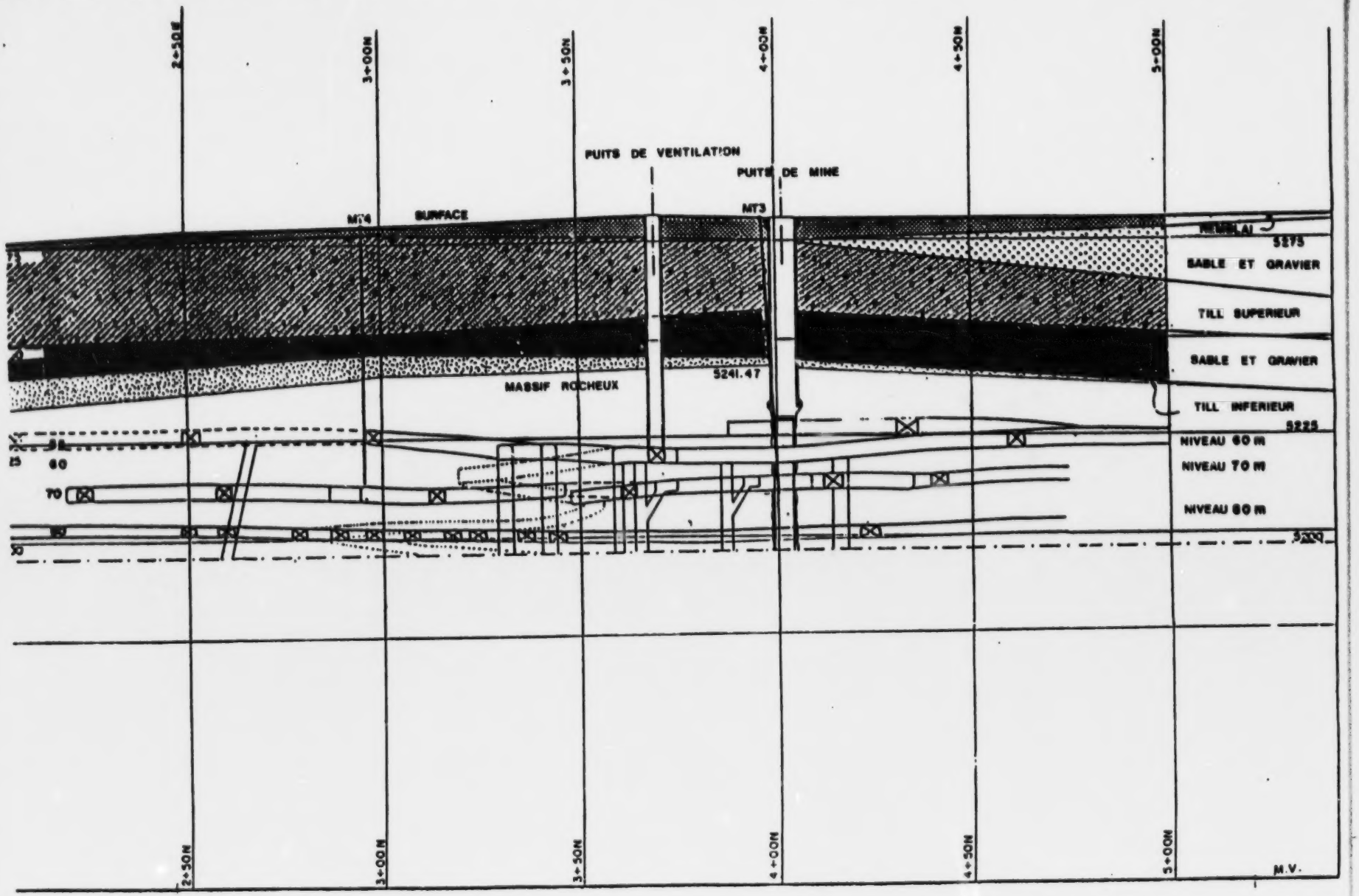


FIG. 4.2 DESCRIPTION DU MORT-TERRAIN

L'une des caractéristiques initiales importantes de cette exploitation était la présence d'une quantité d'eau considérable contenue dans le mort-terrain et susceptible de s'écouler dans les futurs chantiers de la mine. En effet, les premiers estimés indiquaient que le débit pourrait atteindre jusqu'à 190 litres/s. Cependant, la nappe phréatique a été modifiée dès le début des opérations. Nous y reviendrons plus en détails dans les sections suivantes.

En dernier lieu, mentionnons que la zone minéralisée a subi un lessivage poussé dans certains secteurs de sa partie supérieure où il est possible de constater la présence d'altérations de type carbonatisation et kaolinitisation à des degrés divers. Il y a même présence de très larges joints pouvant atteindre de 20 à 30 cm d'ouverture, plongeant à l'intérieur de la minéralisation. Ils sont remplis de sable très fin transporté par les eaux d'infiltration.

4.2 METHODE DE MINAGE

Cette opération est hautement mécanisée. Le minage se fait par la méthode chambres vides post remblayées (après que le minerai ait été totalement extrait par le fond du chantier). L'accès à ces chantiers est assuré par des sous-niveaux, établis à partir d'une rampe de services à tous les 20 mètres. Les niveaux de communication avec le puits sont espacés de 60 mètres.

A cause de la forme particulière du gisement, l'exploitation a débuté au niveau -180 mètres. Tous les accès sont situés dans l'éponte inférieure alors que l'éponte supérieure sert au drainage et à la ventilation.

A chaque sous-niveau d'extraction, le gisement est dépilé sur toute son épaisseur en formant des chantiers de 22 m dans l'axe longitudinal du gisement, en alternance avec des piliers de même dimension. Le support physique de l'opération est assuré par le remblayage des chantiers. Au début de l'exploitation, seul le remblai hydraulique additionné de ciment (20 remblais: 1 ciment) était utilisé; aujourd'hui la compagnie emploie un mélange de "vrac" et de remblai hydraulique additionné de ciment dans le rapport 20:1.

L'objectif ultime de la direction est donc d'atteindre une récupération de 100% du minerai. Elle a déjà commencé l'extraction de certains piliers aux niveaux inférieurs. Le pilier de surface n'est pas encore physiquement réalisé: les opérations ont atteint le niveau -100 m mais se poursuivront jusqu'à -80 m, laissant un pilier de surface temporaire d'environ 35 m d'épaisseur puisque l'interface mort-terrain/socle rocheux se situe à -45 m. La figure 4.3 illustre en vue de coupe, l'aspect de ce futur pilier au niveau 55 m.

4.3 TERMINOLOGIE UTILISEE

Dans cette compagnie minière, nous avons constaté que les terme faisant référence aux piliers sont peu nombreux. A cause de la méthode de minage utilisée, ils sont conformes à ceux que l'on rencontre généralement dans l'industrie minière

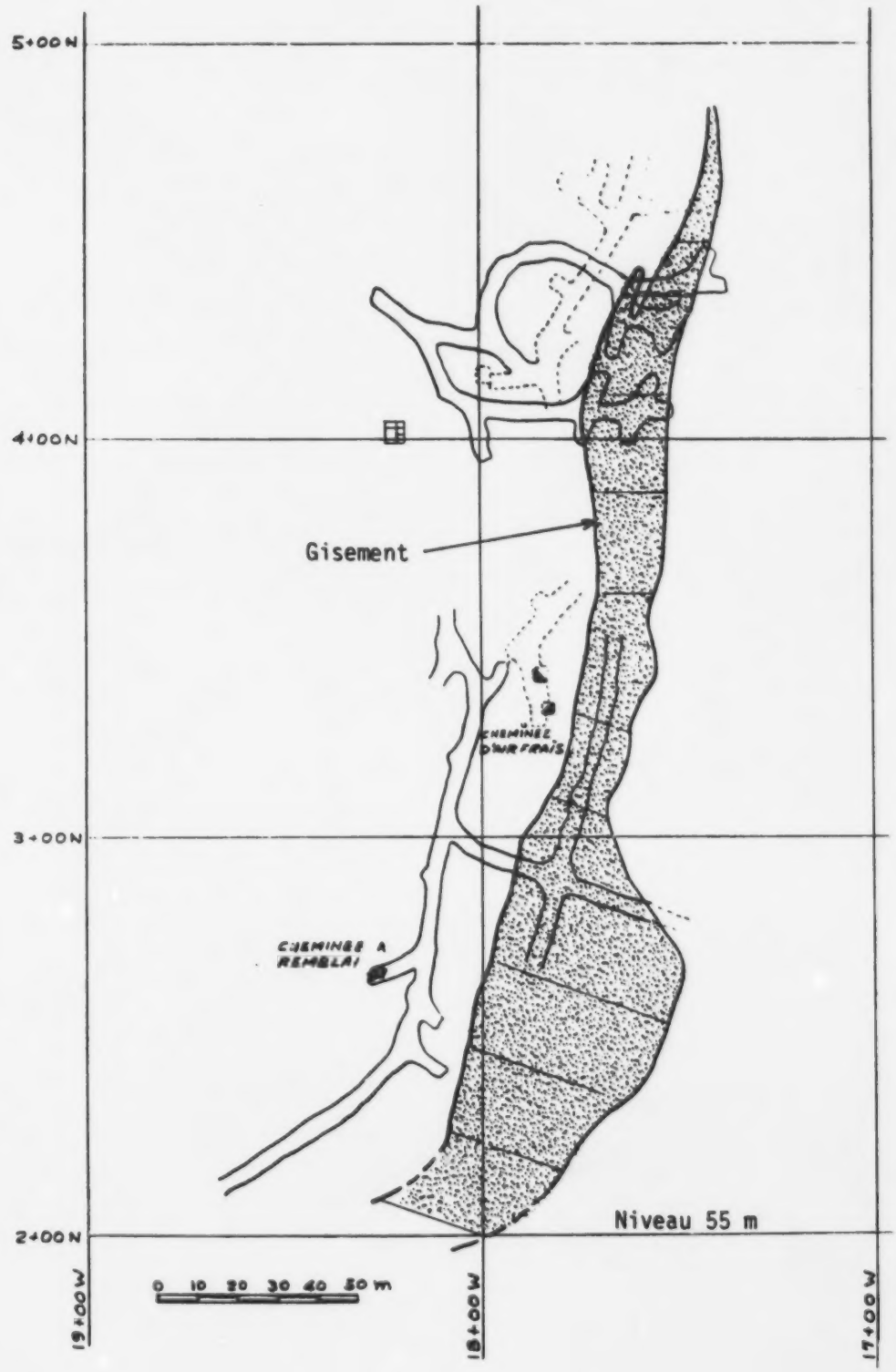


FIG. 4.3 COUPE DU PILIER DE SURFACE

nord-américaine. Les chantiers de chaque niveau sont séparés par des piliers. Le terme est ici utilisé seul mais son rôle est celui des piliers de séparation. Il n'existe pas de piliers horizontaux dans cette mine, sauf le pilier de couronne ou "Crown Pillar".

Les opérateurs de la mine nomment pilier de couronne ou parfois stot la partie supérieure du gisement. Ils englobent dans cette expression l'ensemble du roc situé à la verticale des quelques (20) chantiers supérieurs de la mine. Pour eux, le pilier de couronne est un élément continu de même largeur que la veine minéralisée.

4.4 ELEMENTS DE CONCEPTION DU/DES PILIERS DE SURFACE

4.4.1 Etude des conditions d'eau

Dès les premiers sondages d'exploration, la compagnie a reconnu l'importance du problème d'exploitation pouvant résulter des conditions hydrogéologiques spécifiques à sa propriété. En effet, dans ce secteur, le niveau de la nappe phréatique était à 5 m sous la surface du terrain de recouvrement, épais de plus de 45 m.

Nous voulons résumer dans ce chapitre les techniques d'évaluation et de drainage qui ont été utilisées depuis les débuts des opérations. Bien que le drainage de la mine a comme but premier d'améliorer les conditions d'extraction du minerai, il n'en demeure pas moins une composante majeure dans l'étude de la stabilité du pilier de surface.

La séquence des travaux liés aux études hydrogéologiques a été la suivante:

- Détermination du niveau de la table d'eau à partir des trous d'exploration (forage au diamant)

- Essais de pompage (Pumping Tests) et d'injection (Packers Test) afin de déterminer les coefficients de perméabilité des différentes couches aquifères et types de roche.

- Simulation et évaluation de l'effet des opérations souterraines sur le réseau d'écoulement.

- Essais de perméabilité par la méthode à charge variable et installation de piézomètres à différentes profondeurs

- Mesure de débits à partir des galeries de développement disponibles sous terre. Ces essais ont permis de calculer de nouveaux coefficients de conductivité hydraulique pour différentes zones du massif rocheux.

- Collecte de l'information et réévaluation du régime hydrogéologique. Poursuite des études et installation de nouveaux piézomètres de contrôle.

- Décision de procéder au drainage complet de la mine

- Etablissement d'un réseau de drainage souterrain et début du programme de drainage.

La figure 4.4 illustre le rabattement de la nappe phréatique en fonction du temps. La quantité totale d'eau pompée est représentée à la figure 4.5.

Le point important de cette description est de faire ressortir deux particularités extrêmement intéressantes:

1) Le massif exploité a été dépressurisé (contraintes totales) et drainé

2) La table d'eau a pu être rabattue de telle sorte que le mort-terrain a été drainé à près de 20% de saturation.

Le rabattement de la nappe d'eau a entraîné une augmentation des contraintes effectives dans le massif, améliorant ainsi les conditions de stabilité dans la mine.

4.4.2 Sols au-dessus de la zone minéralisée

La nature des sols à l'aplomb du gisement ainsi que la topographie du socle rocheux ont été identifiés de quatre façons:

1. Des trous de forage au diamant utilisés pour l'exploration ont servi à établir la topographie du socle rocheux. Ces trous sont cependant en grande partie localisés dans l'éponte supérieure (voir figure 4.1) puisqu'ils étaient principalement destinés à transpercer la zone minéralisée selon un angle droit ou presque.

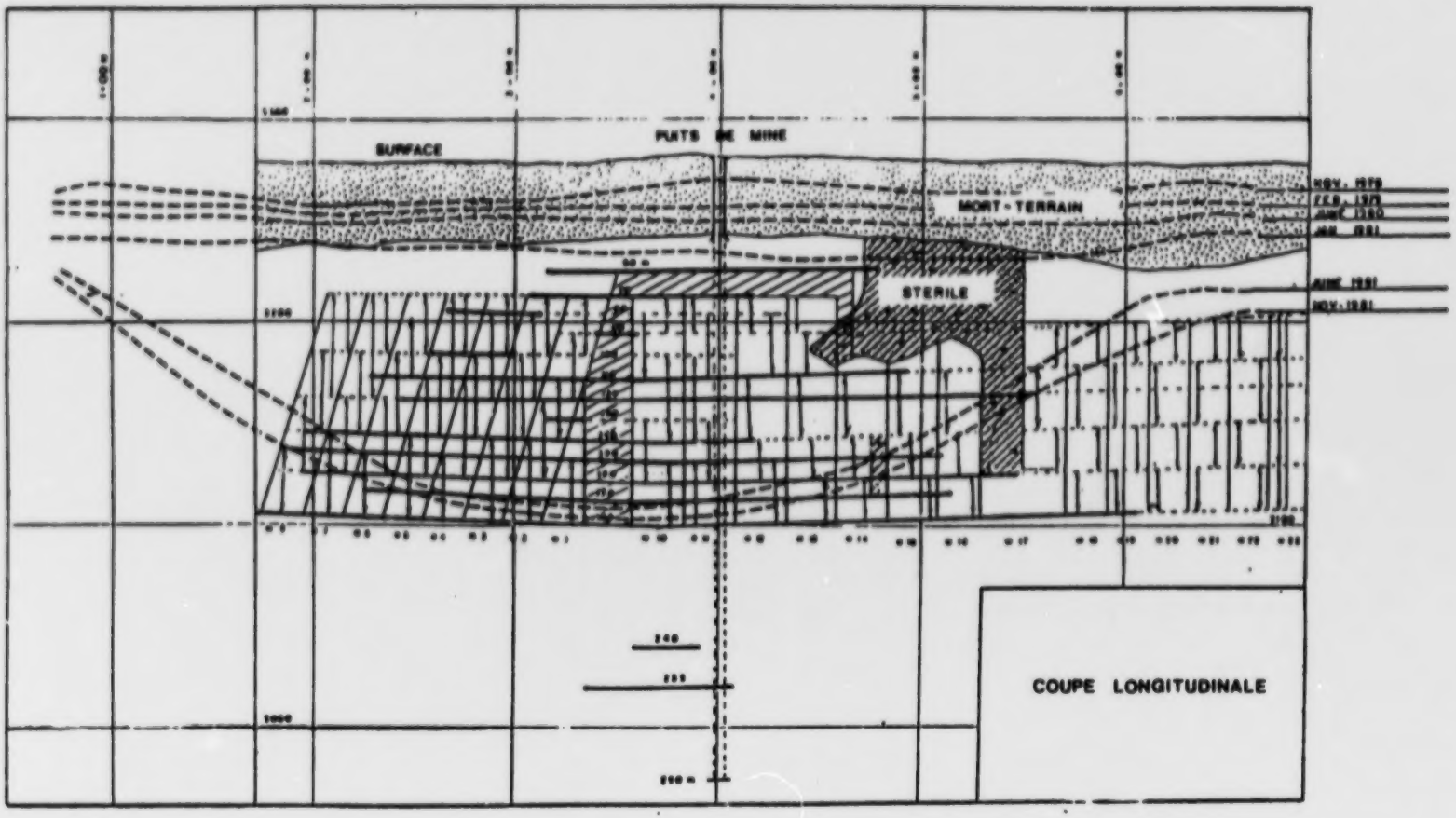


FIG. 4.4 RABATTEMENT DE LA TABLE D'EAU

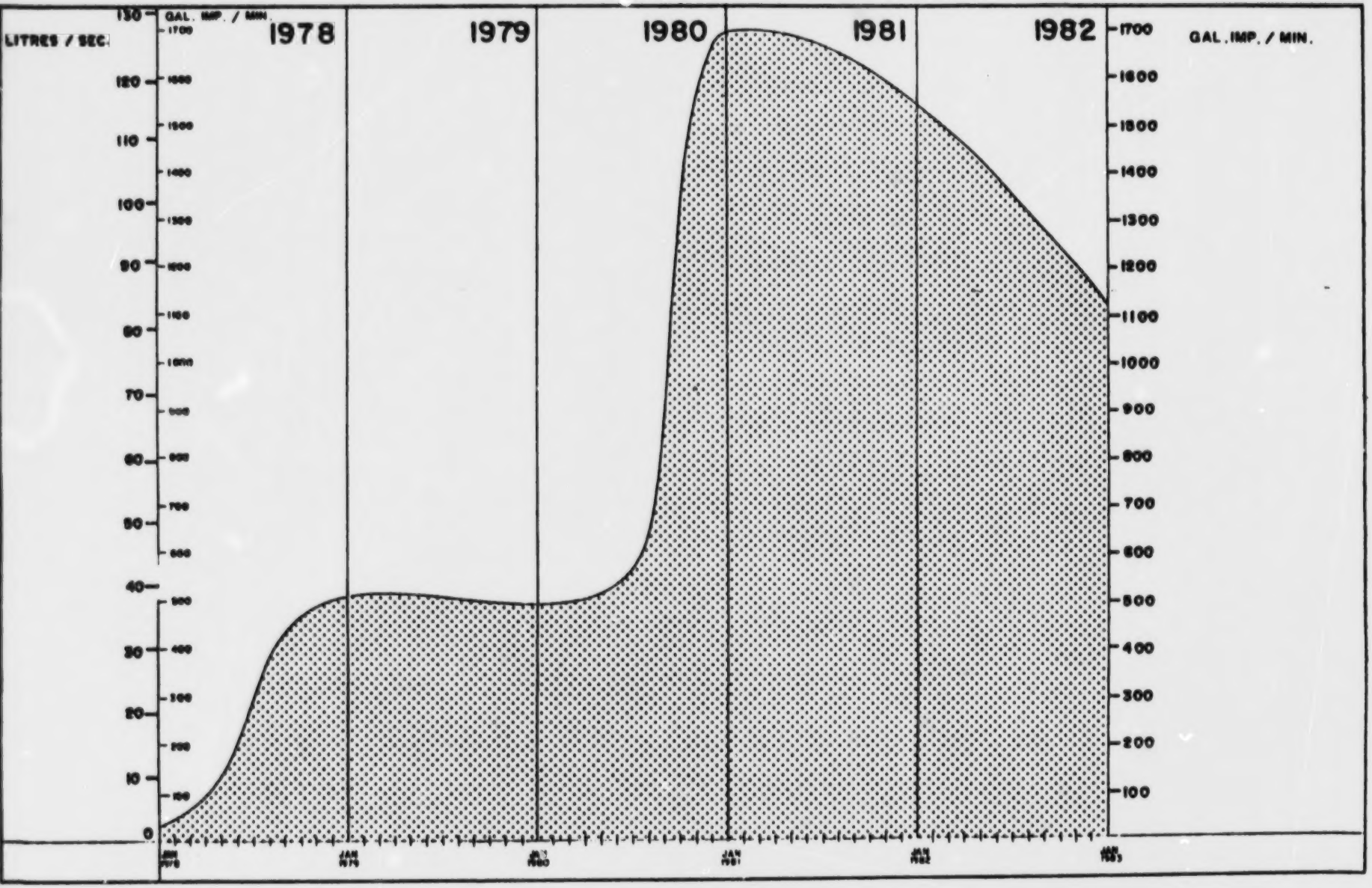


FIG. 4.5 VOLUME D'EAU POMPÉE

2. Au moment des études hydrogéologiques, plusieurs sondages ont permis l'identification des couches de terrain, la localisation du roc, en plus de servir spécifiquement à évaluer le comportement de l'eau dans cette zone.

3. Des sondages séismiques ont été réalisés afin de déterminer la position de l'interface mort-terrain/massif rocheux.

4. Enfin, à partir des galeries de développement de la zone supérieure de la mine, des sondages ont été systématiquement orientés vers le haut afin de mieux définir le point de contact tout en accentuant le drainage du mort-terrain.

Les responsables de la mine recueillent de manière continue des informations sur la position du contact roc-sol, tel qu'indiqué à la figure 4.6. Il est important de noter que l'approche suivie est continue puisque la description de la géométrie du contact est constamment précisée selon les résultats des travaux d'exploration. Les données recueillies sont compilées sur toutes les sections géologiques transversales, à 10 m d'intervalle. Il s'agit là d'une façon pratique de visualiser les variations d'élévation du socle rocheux. Ce suivi permet de déceler toute dépression significative du contact.

Les principales couches de mort-terrain ont été caractérisées en laboratoire. La plupart des essais sur les sols ont été effectués afin de connaître les propriétés mécaniques des sols i.e. densité, granulométrie, résistance au cisaillement, cohésion, etc.

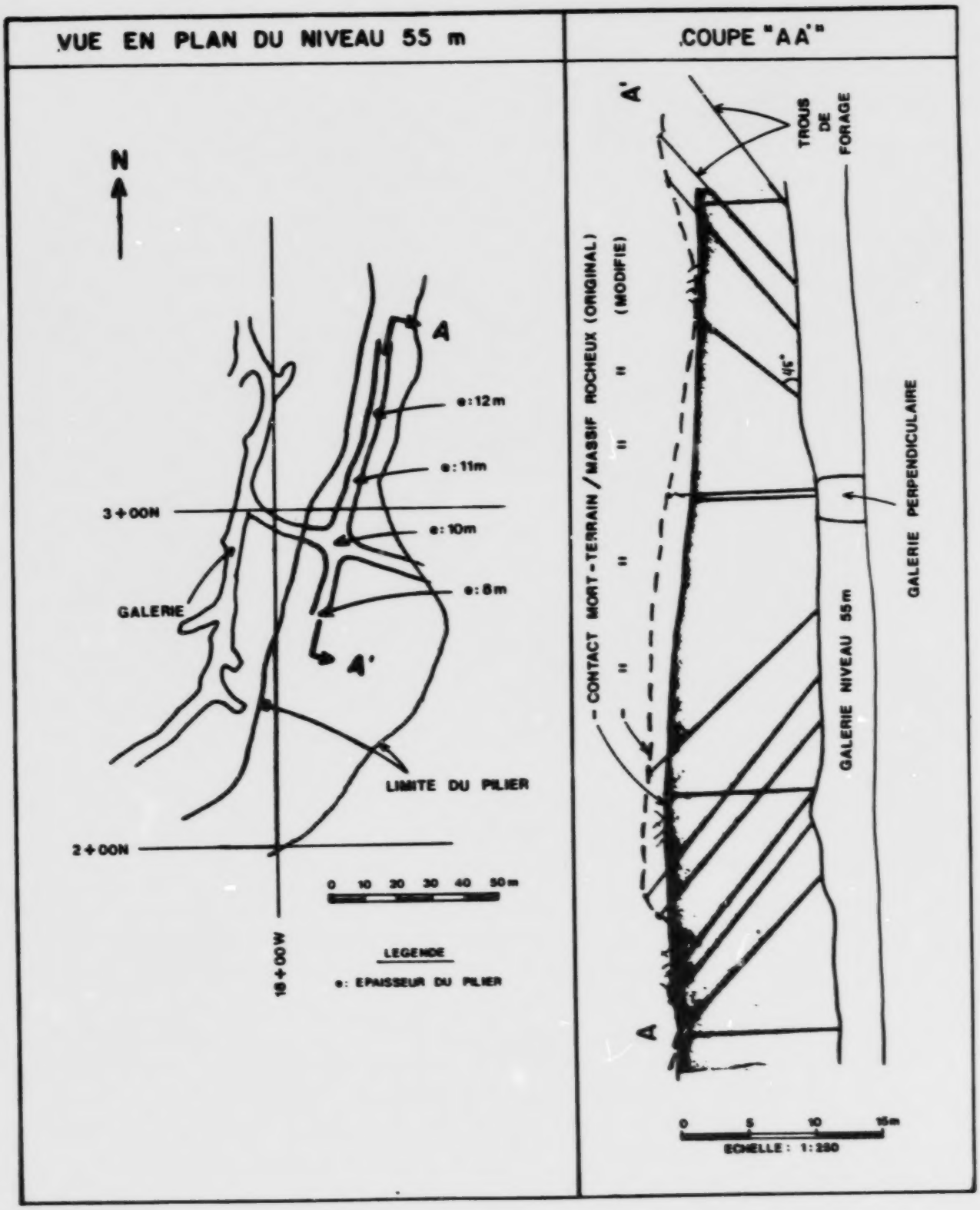


FIG. 4.6 DÉTERMINATION DU CONTACT MORT TERRAIN / SOCLE ROCHEUX

La direction de la mine a voulu vérifier l'effet du drainage en étudiant d'une manière directe le comportement du sol en écoulement libre. La direction a démontré qu'au seuil de "désaturation" et de "dépressurisation" (σ total) atteint, le mort-terrain ne peut plus s'écouler faute d'un manque d'eau. Cet essai a été réalisé dans un chantier en développement, alors qu'une ouverture était forée entre le toit du chantier et le contact du mort-terrain 10 à 12 m plus haut.

Par voie de conséquences, les calculs de stabilité du pilier de surface doivent être révisés en fonction de la réduction des contraintes verticales qu'il devra supporter.

4.4.3 Modélisation de la mine

Une étude sur la stabilité des ouvertures a été entreprise pour l'ensemble de la mine. Cette étude a permis de vérifier l'influence sur le comportement du massif rocheux des trois (3) paramètres suivants:

- Variation de la compétence du remblai
- Variation de l'épaisseur du pilier de surface
- Effet de la variation de la relation d'équilibre définie par Hoek et Brown (1980, EQ. 43)

La méthode de modélisation qui a été utilisée est un programme d'analyse par éléments finis dans lequel on a tenu compte des conditions aux frontières, ayant pour but de préciser le comportement du roc au pourtour des ouvertures. Les informations de base recueillies se composaient principalement de

la résistance en compression uniaxiale du massif, calculée à partir du "Load Point Test" effectué sur les carottes de forage, de la densité des matériaux, du module de Young et du coefficient de Poisson, calculés en laboratoire. Les classifications "CSIR" et "NGI" ont été utilisées afin de déterminer les deux constantes propres au massif m et s, telles que définies par Hoek et Brown dans leurs équations d'équilibre:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\,\sigma_c\,\sigma_3 + s\,\sigma_c^2} \qquad \text{EQ. 43 (Hoek et Brown, 1980)}$$

$$\sigma_t = 1/2\,\sigma_c\,(m - \sqrt{m^2 + 4s}) \qquad \text{EQ. 45 (Hoek et Brown, 1980)}$$

σ_1 = contrainte principale majeure à la rupture en compression

σ_3 = contrainte principale mineure appliquée à l'échantillon

σ_c = résistance en compression uniaxiale de l'échantillon intact

σ_t = résistance en tension uniaxiale de l'échantillon intact

m et s = constantes

Ces critères de rupture ont été utilisés en relation avec le facteur K_o définissant le rapport de la contrainte horizontale sur la contrainte verticale. Le milieu est supposé isotrope, homogène, élastique et uniformément chargé.

Dans le cadre de cette étude, il semble que K_o ait été estimé par des valeurs allant de 1 à 3. Nous ne connaissons pas la valeur σ_c utilisée dans cette analyse. Cependant la résistance moyenne de la roche intacte de cette mine est de 80 MPa (11 600 psi), E = 5 000 MPa (7×10^5 psi) et ν = 0.20 à 0.25.

Cette première analyse de stabilité a fourni aux opérateurs des indications sur le comportement probable du massif et la localisation des zones potentiellement instables.

4.4.4 Mécanique des roches

Il existe à cette mine une équipe d'ingénieurs spécialement effectée au programme de mécanique des roches. Dans le but de fournir des informations de base aux modèles déjà décrits au chapitre précédent, les structures du massif ont été cartographiées. Il s'agissait du relevé des discontinuités majeures, types de roches, etc.

La résistance en compression uniaxiale a été évaluée à partir de "Load Point Test", à différentes sections de forage pour l'éponte inférieure, supérieure et la zone minéralisée. Il peut être intéressant de noter que les valeurs de σ_c s'étendent dans une vaste gamme de valeurs, d'aussi peu que 30 MPa (4 350 psi) jusqu'à 160 MPa (23 200 psi).

Les responsables de la mine se proposent de déterminer "in situ" les contraintes naturelles existantes. Ainsi une vaste zone a été minutieusement cartographiée afin d'analyser la distribution des systèmes de discontinuité à l'intérieur du

massif rocheux et d'évaluer ainsi l'influence de ces discontinuités sur la stabilité des infrastructures souterraines. Cette contribution à l'analyse de la stabilité n'est cependant pas disponible pour l'instant.

4.4.5 Soutènement

Le soutènement du pilier de surface est assuré par le maintien de la stabilité générale de la mine, par sa propre résistance ainsi que diverses techniques de support artificiel. Actuellement l'exploitation n'a pas encore atteint l'épaisseur minimale de pilier désirée; il y a donc peu à dire sur la méthode de soutènement utilisée. Cependant, les opérateurs connaissent déjà passablement bien la composition de ce secteur et entreprennent une série d'essais afin d'évaluer le meilleur type de support qui sera éventuellement requis. A titre d'exemples, le boulon "Swellex" a été vérifié dans une zone de terrain très oxydée et fracturée; l'utilisation de câbles cimentés est anticipée au niveau des épontes.

Le même cheminement est suivi dans le cas des piliers de séparation laissés entre les chantiers (Rib pillar). La norme actuelle établissant ces piliers à 22 mètres de largeur ou longueur par 20 mètres de hauteur, est confrontée avec le comportement des chantiers. Il est prévu de diminuer de moitié la largeur de ces derniers de façon à réduire la portée du toit à 11 mètres, sous le pilier de surface.

Nous pouvons dans ces cas parler d'une approche pas à pas, dans laquelle les résultats des simulations sont ou bien corroborés par le comportement réel du massif ou bien ajustés en fonction d'une meilleure caractérisation des propriétés intrinsèques de ce massif.

4.4.6 Instrumentation/modes de contrôle

A cause de la forme particulière du gisement (voir figure 4.1) et de l'identification des zones potentielles d'instabilité découlant de la modélisation, la direction a décidé d'instrumenter certaines sections du futur pilier de surface. Deux extensomètres classiques à tiges multiples ont été installés à partir de la surface. Le premier dans le haut de l'éponte supérieure, le second dans le pilier de surface. Cette mesure devra permettre de déterminer l'ampleur des déplacements qui pourraient survenir au fur et à mesure de la progression du minage. Ces instruments seront déplacés dans le sens de l'axe longitudinal du gisement, selon la progression du minage.

Comme complément à cette instrumentation, une inspection visuelle des chantiers est chose routinière.

4.4.7 Géométrie des piliers de surface

Comme nous l'avons déjà mentionné, le pilier de surface prévu n'est pas encore découpé. Actuellement, il a une épaisseur de 35 mètres, il varie en largeur de 13 à 45 mètres environ. Il s'agit en fait d'une "dalle" de près de 500 mètres de longueur reposant sur des piliers de 22 m de large espacés éga-

lement de 22 m. Cette dalle peut être considérée comme une série de petits piliers de surface surplombant les chantiers supérieurs. Les chantiers sous-jacents seront totalement remblayés. Le tableau 4.1 montre les dimensions de quelques chantiers ainsi que l'épaisseur des piliers de surface surplombant ces chantiers.

A ce stage, nous ne pouvons présumer de la configuration finale du pilier de surface. Cependant la figure 4.2 présentée au chapitre "méthode de minage" indique en coupe l'aspect général de ce dernier.

4.4.8 Evaluation du massif rocheux

Cette compagnie a utilisé deux méthodes de classification géomécanique des roches: la méthode sud-africaine du C.S.I.R. (South African Council for Scientific and Industrial Research) et celle du N.G.I. (Norwegian Geotechnical Institute). Les deux techniques s'appliquaient à l'ensemble de la mine. Elles ont leurs avantages et inconvénients respectifs et ont servi à établir des sections transversales où les types de roche sont identifiés et qualifiés. Ces sections distantes de 90 mètres ont été jugées utiles par les opérateurs quoiqu'insuffisantes pour la conception détaillée d'un chantier spécifique. L'équipe désire obtenir plus de précision sur le massif rocheux et pour ce faire, pense à augmenter le nombre de ce type de sections.

Rappelons que ces classifications ont été surtout utilisées jusqu'à maintenant au niveau de la modélisation de la mine, tel que mentionné à la section 4.4.3.

TABLEAU 4.1 : DIMENSIONS DE PILIERS DE SURFACE ET CHANTIERS SOUS-JACENTS

	EXEMPLES			
PILIERS DE SURFACE	No 1	No 2	No 3	No 4
MORT-TERRAIN:				
- Epaisseur (m)	45	45	45	45
PILIERS DE SURFACE:				
- Epaisseur (m)	35	35	35	35
CHANTIERS:				
- Longueur (m)	30	48	22	22
- Largeur (m)	22	22	15	15
- Hauteur (m)	20	20	20	20

REMARQUE Ces piliers seront exploités partiellement pour ne laisser finalement qu'environ 10 m d'épaisseur.

4.4.9 Divers

Nous avons déjà mentionné les divers groupes d'études déjà réalisées à cette mine. La direction de la compagnie nous a mentionné qu'elle pense à simuler la séquence de minage qu'elle adoptera. Cette simulation devrait permettre de vérifier l'effet de ce facteur sur la stabilité générale de la mine et du pilier de surface en particulier.

Différentes options ont été étudiées pour l'exploitation optimum du pilier de surface. De telles options visent l'exploitation jusqu'au niveau -55 m, laissant ainsi un stot de protection d'environ 10 m d'épaisseur (figure 4.6). L'arrangement général considéré par la direction est le suivant:

a. chantier primaire de 11 m
b. chantier secondaire de 11 m
c. pilier de 5,5 m
d. chantier primaire de 11 n
e. pilier de 5,5 m

4.5 BILAN DE LA VISITE

Mis à part les aspects sur lesquels la compagnie n'a pas encore pris de décision finale, nous avons recueilli passablement d'informations pertinentes sur les travaux réalisés dans cette mine.

Il se dégage de cette visite un point très intéressant, à savoir que: la philosophie de la gérance repose sur une approche progressive et sécuritaire des problèmes causés par la conception du pilier de surface. Plusieurs éléments sont confrontés afin de dégager une série de lignes directrices; chaque élément contribuant à sa façon à mieux définir les caractéristiques et le comportement du massif rocheux.

Il s'agit là d'un processus dynamique. Les premières informations recueillies sont complétées par l'expérience acquise au cours du minage. Le drainage de la zone exploitée modifie les paramètres naturels du massif qui doit être réévalué en conséquence. La modélisation permet de déceler les zones potentiellement critiques, alors que l'instrumentation de celles-ci pourra ou non indiquer aux opérateurs la nécessité de modifier la méthode de support ou de minage. Dans le même ordre d'idées, certaines mesures quantitatives des propriétés géomécaniques du massif complètent l'information qualitative recueillie sur le terrain.

MINE NO 5

MINE D'OR: ABATTAGE PAR CHAMBRE-MAGASIN NON REMBLAYEE, EXPLOITATION VERTICALE RABATTANTE OU "VERTICAL CRATER RETREAT (VCR)" ET COUPE ET REMBLAI

TABLE DES MATIERES

PAGE

5.0 MINE D'OR: ABATTAGE PAR CHAMBRE-MAGASIN NON REMBLAYEE, EXPLOITATION VERTICALE RABATTANTE OU "VERTICAL CRATER RETREAT (VCR)" ET COUPE ET REMBLAI 264

5.1 BREF HISTORIQUE DE LA MINE 264
5.2 METHODE DE MINAGE 266
5.3 TERMINOLOGIE UTILISEE 270
5.4 ELEMENTS DE CONCEPTION DU/DES PILIERS DE SURFACE 271

5.4.1 Etude des conditions d'eau 271
5.4.2 Sols au-dessus de la zone minéralisée 271
5.4.3 Modélisation de la mine 271
5.4.4 Mécanique des roches 272
5.4.5 Soutènement 272
5.4.6 Instrumentation/modes de contrôle 274
5.4.7 Géométrie des piliers de surface 275
5.4.8 Evaluation du massif rocheux 275
5.4.9 Divers 277

5.5 BILAN DE LA VISITE 279

MINE NO 5

5.0 MINE D'OR: ABATTAGE PAR CHAMBRE-MAGASIN NON REMBLAYEE, EXPLOITATION VERTICALE RABATTANTE OU "VERTICAL CRATER RETREAT (VCR)" ET COUPE ET REMBLAI

5.1 BREF HISTORIQUE DE LA MINE

Depuis 1936, cette compagnie exploite une zone minéralisée à faible teneur en or, d'une longueur approximative de 3,2 kilomètres. Cette zone suit le contact entre deux massifs d'âge géologique différent et est orientée dans l'axe longitudinal est/ouest d'un synclinal renversé. La minéralisation se retrouve à l'intérieur de roches volcaniques, d'un conglomérat et de graywacke. Le pendage des couches sédimentaires varie entre 70° et 80°N (figure 5.1).

Plus de 54% du minerai extrait provient du conglomérat dont la largeur varie de 12 à 18 mètres. La formation de graywacke située au sud a pour sa part produit 28% du minerai alors que les roches volcaniques localisées plus au nord ont fourni 18% du minerai exploité à ce jour. La bande minéralisée est recouverte de 6 à 18 mètres de mort-terrain composé de sable et gravier.

Le minerai est disséminé dans des veines de quartz d'épaisseur variable. Leur orientation est généralement N20°-45°E, leur espacement est très rapproché et elles plongent de 10° à 70° vers le sud. Un réseau majeur de failles joue un rôle prédominant dans la structure de ce gisement. Il existe des centaines de failles qui le recoupent, produisant des déplacements horizontaux et verticaux compris entre quelques centimètres et des dizaines de mètres.

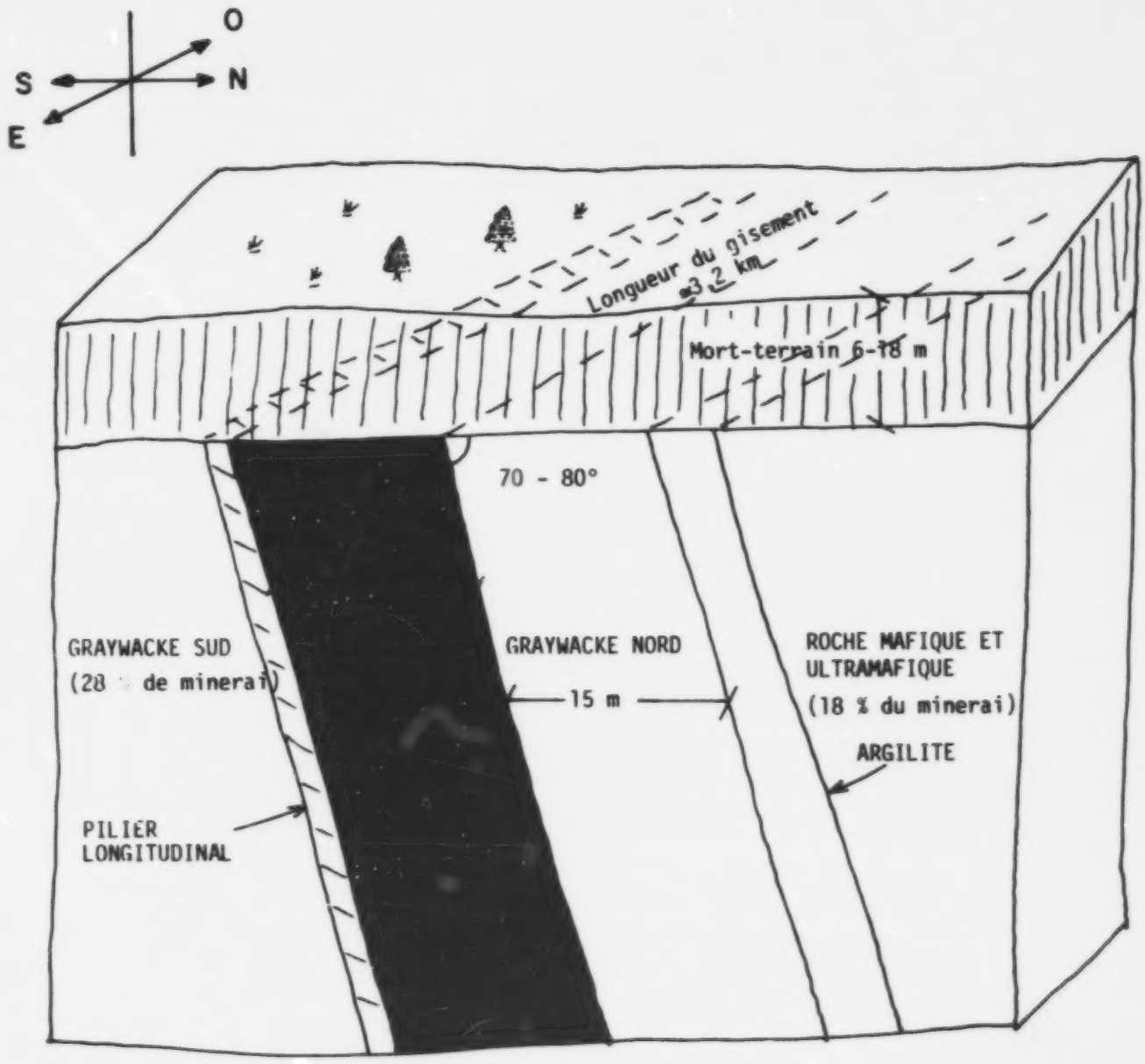


FIG. 5.1 COUPE TRANSVERSALE DU GISEMENT

Dans la mine, les niveaux d'exploitation sont généralement espacés de 61 m et le puits principal atteint présentement le niveau -945 m.

5.2 METHODE DE MINAGE

Au début de l'exploitation du gisement, la méthode chambre-magasin était utilisée pour l'extraction du minerai des chantiers supérieurs. Des trous horizontaux dirigés selon la direction de la couche stratigraphique minéralisée servaient à abattre le minerai en tranches successives, du bas vers le haut. Dans certaines occasions, des trous de sautage verticaux étaient aussi utilisés. Une partie du minerai cassé était laissée dans le chantier et servait de plate-forme pour miner le minerai intact situé dans le plafond. Après l'extraction complète du minerai, le chantier était abandonné sans être remblayé. Les chantiers étaient séparés par des piliers de paroi (rib pillars) dans lesquels des galeries de passage étaient percées. Les dimensions de ces piliers de paroi sont:

- Longueur = 15 à 24 m (selon la largeur du dépôt)
- Largeur = 10 m
- Hauteur = 53 m
- Espacement entre les piliers = 58 m
- Piliers superposés d'un niveau à l'autre

La figure 5.2 illustre en coupe longitudinale les chantiers supérieurs exploités par la méthode chambre-magasin non remblayée.

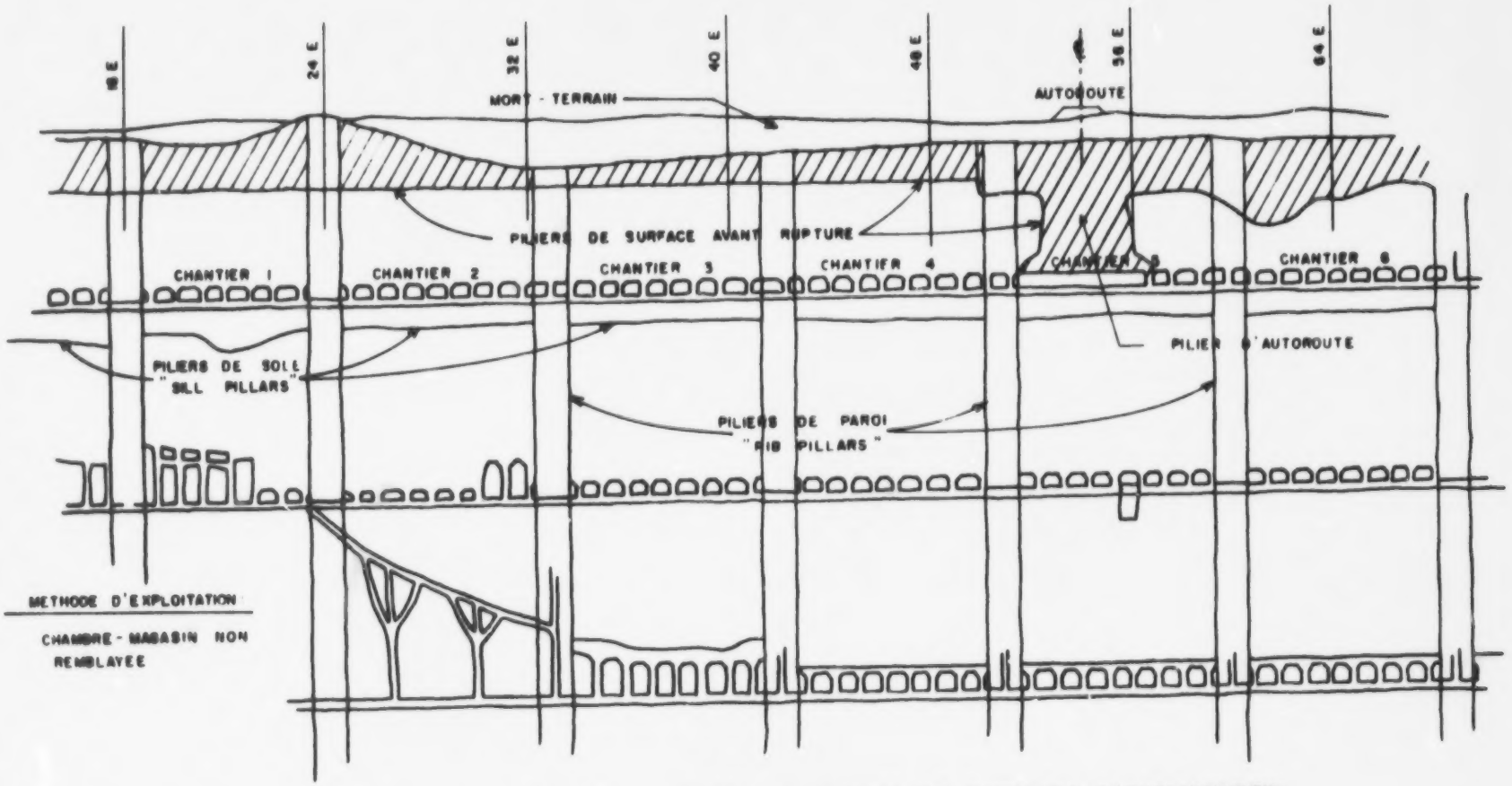


FIG 5.2 PILIERS DE SURFACE ET CHANTIERS D'EXPLOITATION: COUPE LONGITUDINALE

Présentement, le minerai est exploité selon les méthodes exploitation verticale rabattante ou "VCR" (Vertical Crater Retreat) (figure 5.3) et coupe et remblai. Avec la méthode "VCR", une première coupe de minerai est prise à pleine largeur et longueur ("overcut") dans le haut du chantier, alors que des points de soutirage sont construits dans le bas de ce dernier. L'exploitation suit par la suite les étapes suivantes:

- des trous (165 mm Ø) sont forés à partir du haut du chantier jusqu'à la première tranche de minerai à exploiter, soit celle située immédiatement au-dessus des points de soutirage;

- les tranches subséquentes sont exploitées en retraitant du bas vers le haut.

Les dimensions des chantiers exploités par la méthode "VCR" se détaillent comme suit:

- Longueur = 60 m
- Largeur = 15 à 25 m (selon la largeur du dépôt)
- Hauteur = 53 m

Tout comme dans la méthode chambre-magasin, des piliers de paroi délimitent les chantiers développés avec la méthode "VCR". Ces piliers possèdent sensiblement les mêmes dimensions que celles mentionnées antérieurement et sont superposés d'un niveau à l'autre. Parfois, lorsque la faible qualité du toit l'exige, un pilier est laissé au centre d'un

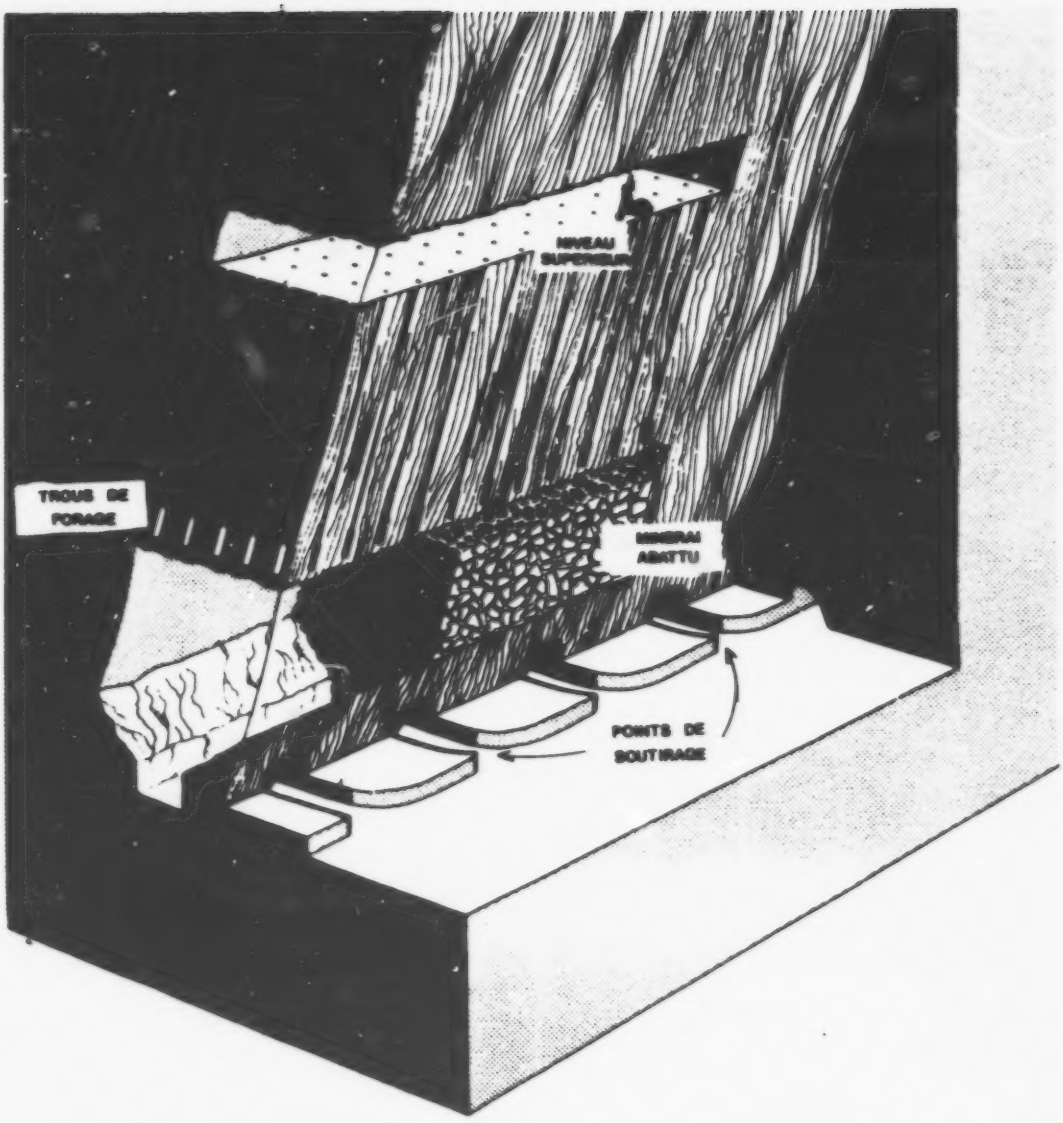


FIG. 5.3 MÉTHODE DE MINAGE: EXPLOITATION VERTICALE RABATTANTE OU " VERTICAL CRATER RETREAT (V.C.R.)" .

(Figure tirée du guide d' Atlas Copco, 1980)

chantier. Les chantiers complètement exploités ne sont pas encore remblayés. Il est à noter que certains piliers de centre et de paroi pourront être récupérés si le programme prévu de remblayage donne les résultats escomptés.

La méthode coupe et remblai, déjà décrite dans les chapitres précédents, est également utilisée pour l'exploitation des chantiers plus profonds. Les types de remblai seront les mêmes que ceux utilisés pour remblayer les chantiers exploités par la méthode "VCR".

5.3 TERMINOLOGIE UTILISEE

La direction de la mine emploie plusieurs termes dont certains désignent parfois le même type de pilier. En effet, les piliers de paroi sont désignés par les termes "rib pillars", "end pillars", "transverse pillars" ou encore "vertical pillars across the ore". Les piliers séparant les chantiers supérieurs des chantiers inférieurs sont appelés "Sill Pillars". Ceux-ci demeurent horizontaux et permanents et ils pourraient tout aussi bien désigner les piliers de couronne.

Le terme "longitudinal pillar" est utilisé pour désigner un pilier permanent laissé entre le conglomérat et le graywacke sud (figure 5.1). Ce pilier suit la direction et le pendage du contact conglomérat-graywacke sud. Les piliers laissés au centre de certains chantiers larges sont nommés "Center Pillars".

Les piliers laissés entre le mort-terrain et les chantiers supérieurs sont désignés par le terme "surface pillar".

5.4 ELEMENTS DE CONCEPTION DU/DES PILIERS DE SURFACE

5.4.1 Etude des conditions d'eau

La direction mentionne qu'aucun problème d'eau n'est venu perturber les opérations minières et aucune étude hydrologique n'a été entreprise.

5.4.2 Sols au-dessus de la zone minéralisée

Les piliers de surface que nous avons étudiés à cette mine ont tous cédé et se retrouvent maintenant dans les chantiers du premier niveau. Antérieurement, les piliers étaient recouverts à plus de 90% par des dépôts de sable et gravier. L'épaisseur de ces dépôts variait de 0 à 18 mètres, avec une moyenne approximative de 11 m. Aucune nappe d'eau n'avait été détectée dans ce mort-terrain. Suite à l'effondrement des piliers de surface survenu il y a plusieurs années, l'incursion du mort-terrain dans les chantiers supérieurs s'était produite sans qu'aucune intrusion d'eau ne soit signalée dans la mine. La section 5.4.9 donne plus de détails sur cet effondrement.

5.4.3 Modélisation de la mine

Aucun modèle n'a été appliqué dans l'étude de stabilité des piliers de surface.

5.4.4 Mécanique des roches

Un programme de mécanique des roches a récemment été mis sur pied par la direction. A cause de certains problèmes structuraux, la direction a décidé de tester différents types de boulonnage. Pour ce faire, la direction a mis l'accent sur la cartographie structurale de détail. En plus de la description des carottes de forage qui comprend la minéralisation, la roche hôte, le type d'altération, le R.Q.D. et l'étude des joints, on note que les caractéristiques structurales comme les zones de cisaillement ou encore les failles majeures ou mineures (avec direction et pendage) sont répertoriées et le matériel de remplissage des discontinuités est analysé. Toutes ces informations seront éventuellement mises sur plans et sections qui servent de guide aux ingénieurs responsables des travaux souterrains. La figure 5.4 illustre une vue en plan du premier niveau où on peut distinguer les galeries de roulage et les discontinuités (failles) cartographiées dans ces galeries.

Quelques échantillons de roches prélevés dans le conglomérat ont donné des résistances en compression simple variant entre 105 et 207 MPa (15 200 et 30 000 psi).

5.4.5 Soutènement

Dans le passé, les mesures de soutènement utilisées dans la mine étaient surtout le boulonnage, un peu de ciment (dans les stations), des madriers, des treillis et des cintres d'acier. Maintenant, la direction minière emploie régulièrement les boulons dans les chantiers, des tiges de métal résinées ou cimentées, des câbles, des boulons à friction "Swellex" et à friction "split-set".

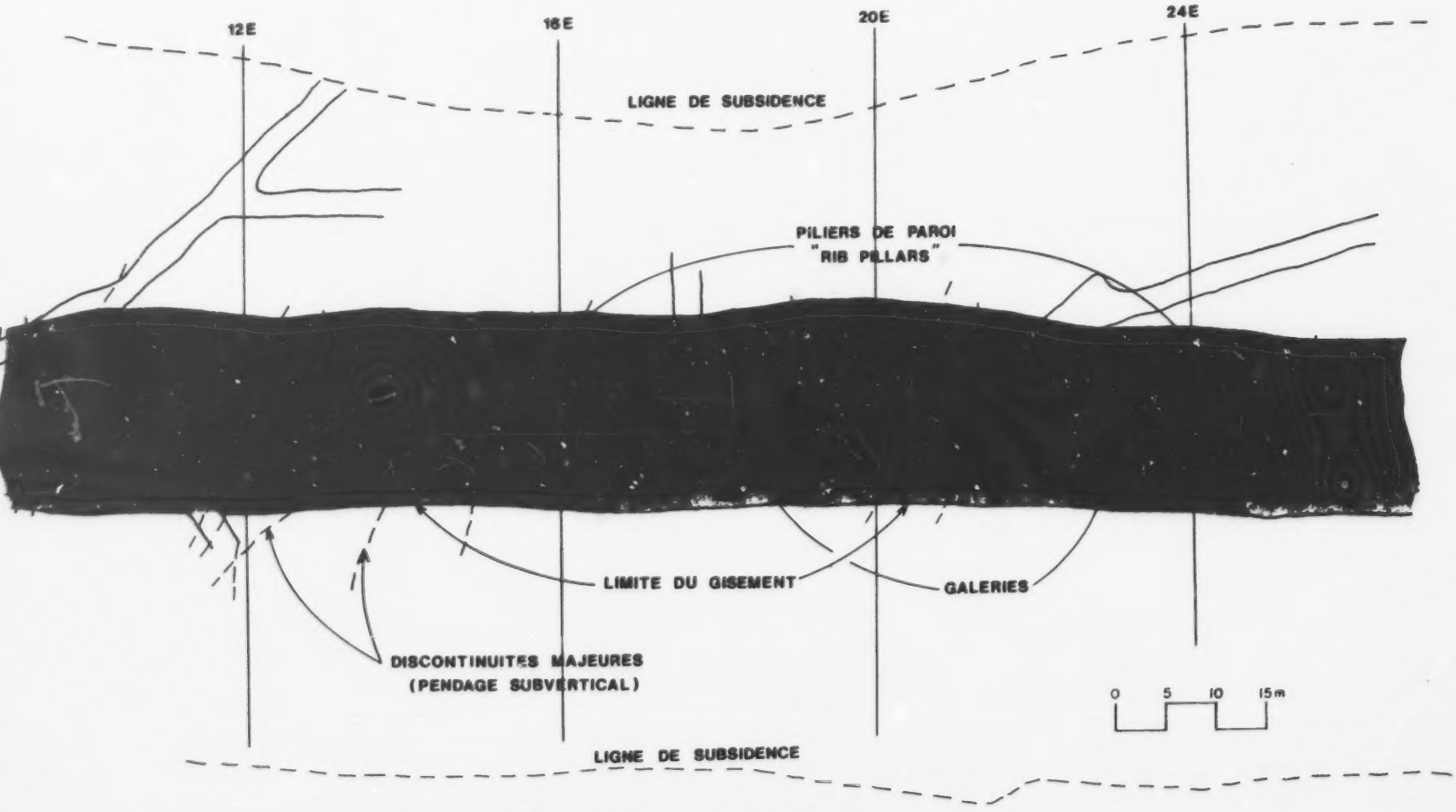


FIG. 5.4 VUE EN PLAN DU PREMIER NIVEAU DE SOUTIRAGE

Tel que mentionné à la section 5.2, quelques-uns des chantiers profonds sont remblayés. Ceci assure une meilleure stabilité des chantiers et empêche l'écaillage des murs. De plus, le remblayage permet de récupérer les piliers de paroi contenant du minerai. Comme mesure de protection, un large pilier longitudinal suivant le contact conglomérat-graywacke sud (figure 5.1) a été stérilisé afin de renforcer l'éponte inférieure.

5.4.6 Instrumentation / modes de contrôle

Tous les chantiers sont inspectés visuellement afin de déceler toute anomalie signifiant une instabilité ou un danger potentiel. Des repères sont utilisés pour détecter les mouvements éventuels du massif rocheux: des lignes de peinture sont tracées de part et d'autre des fractures décelées dans le massif ou encore des plaques de verre sont collées sur les surfaces montrant des discontinuités. L'espacement des points de repère situés de part et d'autre des discontinuités est mesuré à l'aide d'un "turnbuckell micrometer". Des mesures de profondeur effectuées dans des trous de sondage permettent également de déceler des mouvements éventuels dans le massif rocheux.

Tous les types de piliers sont inspectés périodiquement, plus spécialement ceux situés dans des zones de faiblesse.

5.4.7 Géométrie des piliers de surface

Le tableau 5.1 montre les dimensions qu'avaient les six piliers de surface ainsi que les dimensions des chantiers sous-jacents. Ces piliers sont illustrés à la figure 5.2.

L'épaisseur des piliers de surface variait de 14 à 38 m et le mort-terrain situé au-dessus de ces piliers varie de 0 à 15 m. Avant que ces piliers ne s'effondrent, une autoroute passait au-dessus du chantier No 5, lequel présentait un pilier spécial de 27 m x 17 m x 37 m de hauteur.

Les rapports "épaisseur des piliers de surface / largeur du chantier sous-jacent" étaient très bas avec des valeurs oscillant entre 0,8 et 2,2.

5.4.8 Evaluation du massif rocheux

L'évaluation du massif rocheux s'effectue avec les données structurales recueillies à partir des carottes de forage et des données cartographiques. Aucune classification des massifs rocheux telles "NGI", "CSIR" ou encore "Laubscher" n'est utilisée par la direction. La qualité du massif rocheux est évaluée selon les critères développés par les ingénieurs et les géologues de mine. Ces critères sont basés sur l'expérience et sur les réactions du massif rocheux depuis le début de l'exploitation.

TABLEAU 5.1 : DIMENSIONS DE PILIERS DE SURFACE ET CHANTIERS SOUS-JACENTS AVANT QU'ILS NE S'EFFONDRENT

	EXEMPLES					
PILIERS DE SURFACE	NO 1	NO 2	NO 3	NO 4	NO 5	NO 6
MORT-TERRAIN:						
- Epaisseur (m)	8	0-15	14	8	8	8
PILIER DE SURFACE:						
- Epaisseur (m)	14	14	14	18	38	14-36
CHANTIERS: (Exploités par la méthode chambre-magasin non remblayée)						
- Longueur (m)	50	56	58	58	59	58
- Largeur (m)	17	18	15	18	17	21
- Hauteur (m)	37	37	37	37	37	37

5.4.9 Divers

Avant de s'effondrer, il y a environ vingt-cinq ans, les piliers de surface avaient tenu le coup un peu plus de dix ans. La figure 5.5 montre une coupe transversale illustrant l'effondrement du pilier de surface jusqu'au premier niveau. La méthode d'exploitation (méthode chambre-magasin non remblayée) qui était utilisée pour exploiter les chantiers supérieurs a laissé une série de chantiers vides recouverts de minces piliers de surface. Il est à noter que la direction de la mine prévoyait cet effondrement et qu'aucune personne ne fut blessée au cours de l'événement. Les principales causes retenues responsables de la rupture des piliers de surface sont:

- l'exploitation trop prononcée des chantiers sous-jacents: les changements de contraintes induites par l'extraction du minerai ont entraîné la rupture des piliers de surface devenus trop minces (tableau 5.1);

- le non remblayage des chantiers;

- la présence de discontinuités dans le massif (figure 5.4): de nombreuses failles mineures caractérisent le massif rocheux et ont probablement contribué à accélérer le processus d'effondrement.

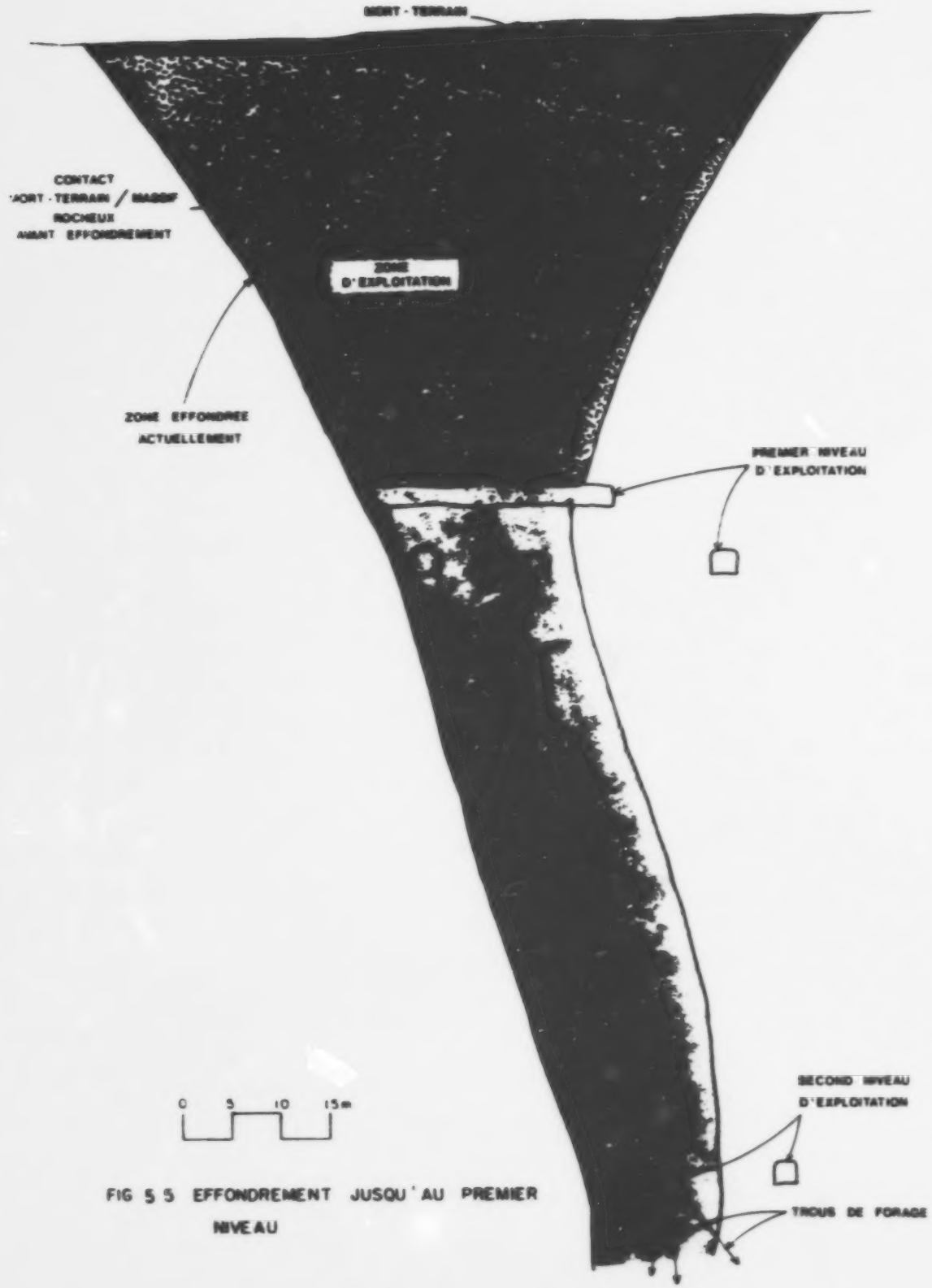


FIG 5 5 EFFONDREMENT JUSQU'AU PREMIER NIVEAU

5.5 BILAN DE LA VISITE

Les critères de conception des piliers de surface appliqués par la direction proviennent surtout de l'expérience pratique des ingénieurs miniers de la compagnie et des exemples tirés des mines possédant des caractéristiques semblables à la mine visitée.

Pour les chantiers supérieurs, la direction avait évalué assez bien leurs dimensions et celles des piliers car ces derniers ont résisté de 5 à 15 ans après la fermeture des chantiers. La direction connaissait la nature du mort-terrain et la non possibilité de ce dernier de se liquéfier, faute d'une quantité importante d'eau. C'est d'ailleurs ce qui avait motivé la direction à augmenter le taux de défruitement des chantiers supérieurs.

La direction de la mine entend utiliser de plus en plus des données de terrain et de laboratoire pour la conception des divers types de piliers. La cartographie des discontinuités et la description des carottes de forage sont systématiquement exécutées et/ou étudiées par les ingénieurs responsables des travaux souterrains. Les résultats des essais exécutés sur les échantillons de roche sont intégrés dans les analyses de stabilité du massif rocheux.

MINE NO 6

MINE D'OR: COUPE ET REMBLAI, CHAMBRE-MAGASIN POST-REMBLAYEE

TABLE DES MATIERES

PAGE

6.0 MINE D'OR: COUPE ET REMBLAI, CHAMBRE-MAGASIN POST-REMBLAYEE 282

6.1 BREF HISTORIQUE DE LA MINE 282
6.2 METHODE DE MINAGE 285
6.3 TERMINOLOGIE UTILISEE 288
6.4 ELEMENTS DE CONCEPTION DU/DES PILIERS DE SURFACE 291

6.4.1 Etude des conditions d'eau 291
6.4.2 Sols au-dessus de la zone minéralisée 291
6.4.3 Modélisation de la mine 292
6.4.4 Mécanique des roches 295
6.4.5 Soutènement 296
6.4.6 Instrumentation/modes de contrôle 299
6.4.7 Géométrie des piliers de surface 300
6.4.8 Evaluation du massif rocheux 300
6.4.9 Divers 303

6.5 BILAN DE LA VISITE 303

MINE NO 6

6.0 MINE D'OR: COUPE ET REMBLAI, CHAMBRE-MAGASIN POST-REMBLAYEE

6.1 BREF HISTORIQUE DE LA MINE

Même si ce potentiel aurifère était connu au début du siècle, ce n'est qu'en 1964 et 1965 que des travaux intensifs d'exploration ont permis de découvrir le gisement et d'en définir grossièrement les dimensions. Déjà à cette époque, un premier puits d'exploration avait été creusé. Récemment, la propriété a été réévaluée et la décision a été prise d'en débuter l'exploitation.

La zone en exploitation repose à l'intérieur de roches d'origine volcanique où l'on retrouve des intrusifs composés de péridotite, parfois de granodiorite. La zone minéralisée est une brèche contenant en moyenne plus de 5% de pyrite dont le pendage varie de 20° à 50° vers l'ouest. L'axe longitudinal du gisement s'étend sur environ 250 mètres orienté N-S, alors que sa longueur (dans le sens du pendage) est de 500 mètres et son épaisseur moyenne de 20 mètres. Cette brèche très compétente recoupe les péridotites qui, dans la zone de contact, ont subi une forte altération et ont été transformées en schistes talqueux et chloriteux. Cette altération diminue en s'éloignant du contact de la brèche. Les figures 6.1 et 6.2 illustrent respectivement la composition du massif rocheux contenant le gisement et les infrastructures souterraines de la mine.

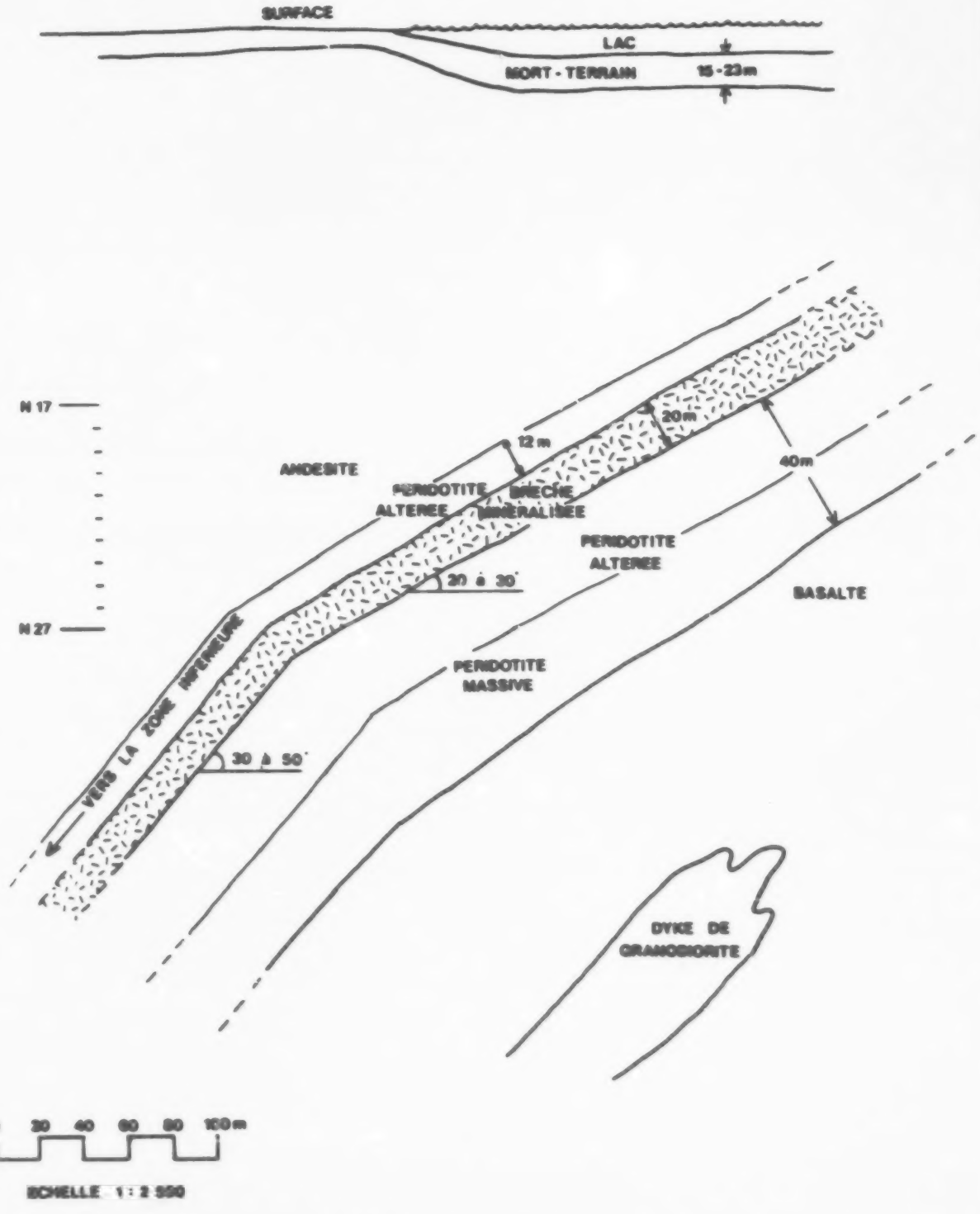


FIG 6.1 COMPOSITION DU MASSIF (Section verticale simplifiée)

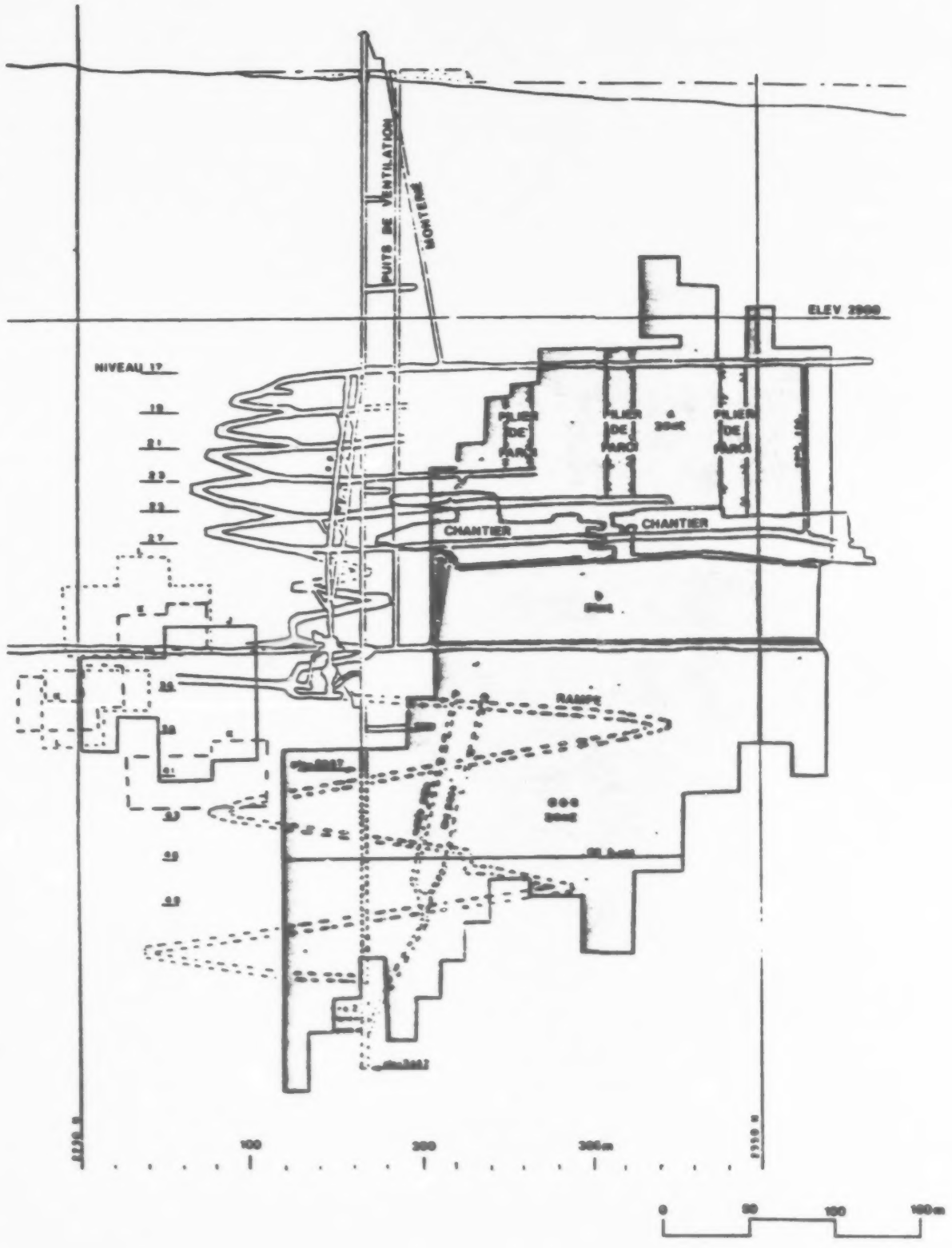


FIG. 6.2 VUE LONGITUDINALE DES NIVEAUX, DU GISEMENT ET DU CHANTIER D'ABATTAGE

6.2 METHODE DE MINAGE

La principale méthode de minage est celle dite par chambre remblayée; elle compte pour environ 80% de la production totale de la mine. Le reste est produit par chantiers ouverts, remblayés postérieurement. L'accès aux différents sous-niveaux espacés de 20 m est assuré par une rampe de service. A partir de l'éponte supérieure, la galerie d'accès du niveau se subdivise en deux ou trois galeries d'accès aux chantiers et recoupe la direction du gisement à angle droit, ce qui permet d'effectuer dans chaque chantier cinq (5) coupes d'une hauteur de 4 mètres. Les galeries mesurent 5 mètres de largeur par 3,5 mètres de hauteur. Le minerai de chacune des coupes est extrait puis le chantier est immédiatement remblayé. Dans certaines zones spécifiques, la méthode des longs trous est utilisée afin d'excaver des chambres de 15 m x 20 m de hauteur qui seront également remblayées, mais seulement après soutirage total. Les figures 6.3 et 6.4 décrivent respectivement la position des accès et chantiers d'un niveau de production ainsi que la méthode de minage des cinq coupes ou tranches.

L'objectif principal des opérateurs est d'extraire 100% de la zone minéralisée. Pour ce faire, le minage primaire permettra d'extraire 60% du volume total estimé. L'utilisation du remblayage assurera le recouvrement des piliers longitudinaux qui constituent 20% du minerai. Par la suite, selon le comportement du massif, la dernière tranche de 20% sera extraite des (3) piliers transversaux. Cette séquence de minage prévue pourra évidemment être ajustée dans le temps en fonction de contraintes difficiles à préciser à ce stage des opérations.

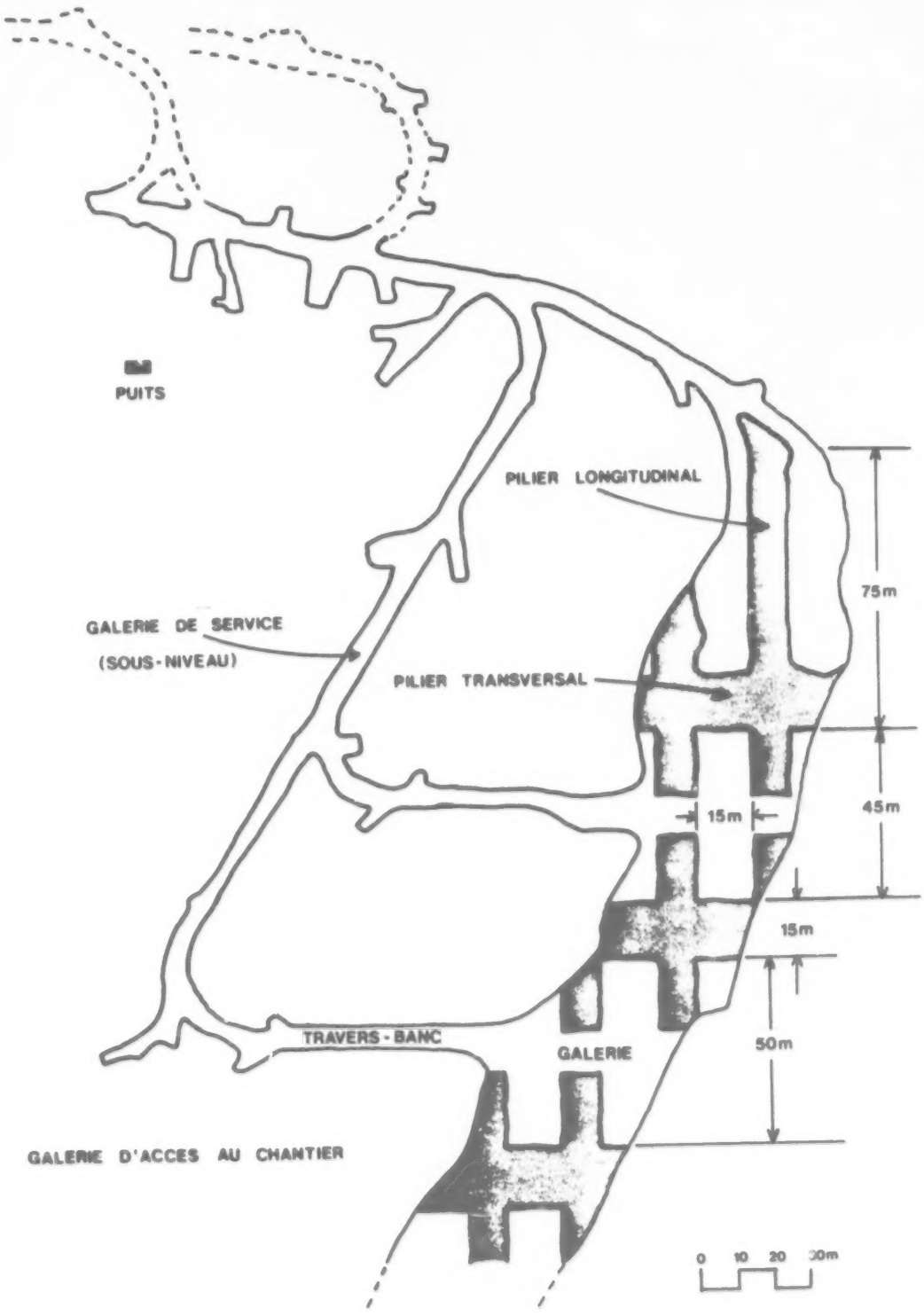


FIG. 6.3 VUE EN PLAN D'UN SOUS NIVEAU

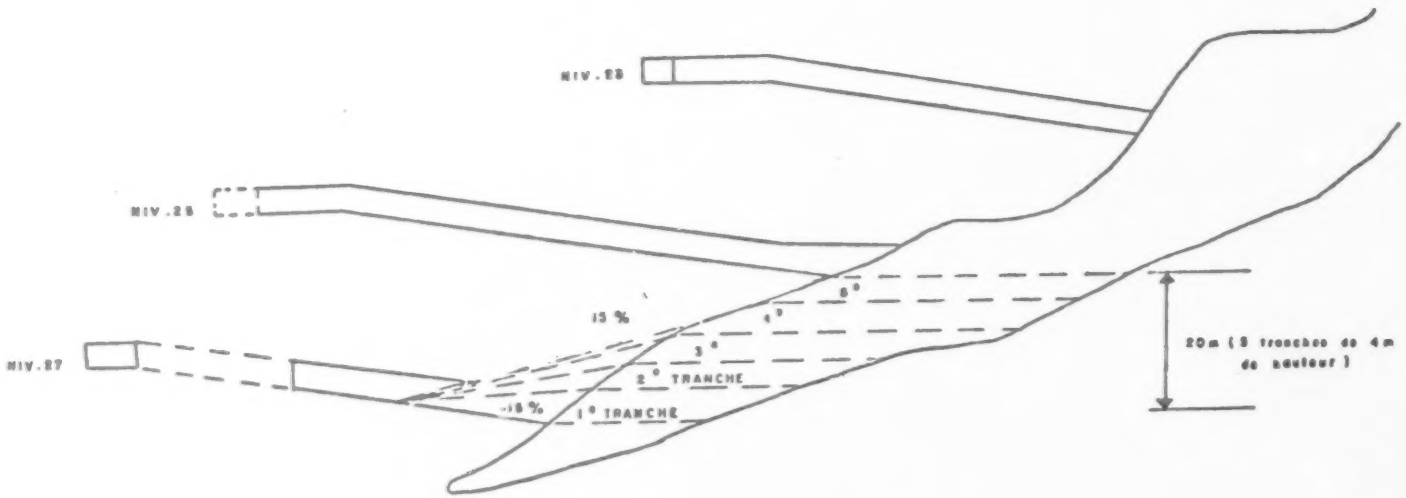


FIG. 6.4 SCHEMA DE LA METHODE D'EXTRACTION DU MINERAI

6.3 TERMINOLOGIE UTILISEE

A cause de la méthode de minage utilisée, la direction de cette mine n'utilise que trois types de piliers.

- Les piliers transversaux sont au nombre de trois. Ils sont orientés dans la direction du pendage et maintiennent l'écartement entre l'éponte inférieure et supérieure. Leur largeur est de 15 mètres et leur hauteur correspond à l'épaisseur de la zone minéralisée, soit en moyenne 20 m.

- Les piliers longitudinaux sont pour leur part orientés selon l'axe du gisement. Laissés verticalement entre les chambres des chantiers, ils ne sont pas continus et mesurent 10 m de largeur par une vingtaine de mètres de hauteur en moyenne. Ils seront éventuellement entourés de remblai sur trois de leurs faces. Leur rôle principal est de limiter l'ouverture d'extraction à des largeurs permettant un support adéquat du terrain.

- Le pilier de surface est ici défini comme étant la masse rocheuse surplombant la brèche minéralisée. La définition de la direction de cette mine s'apparente à celle que nous avons proposée au cours de notre étude. Dans cette mine, il est difficile d'identifier les dimensions réelles du pilier de surface (voir figure 6.5 et 6.6) puisque la brèche exploitée se termine à environ 110 mètres de la surface, qu'elle est relativement peu épaisse et d'une longueur de près de 100 mètres dans le plan horizontal et qu'elle présente un pendage variable.

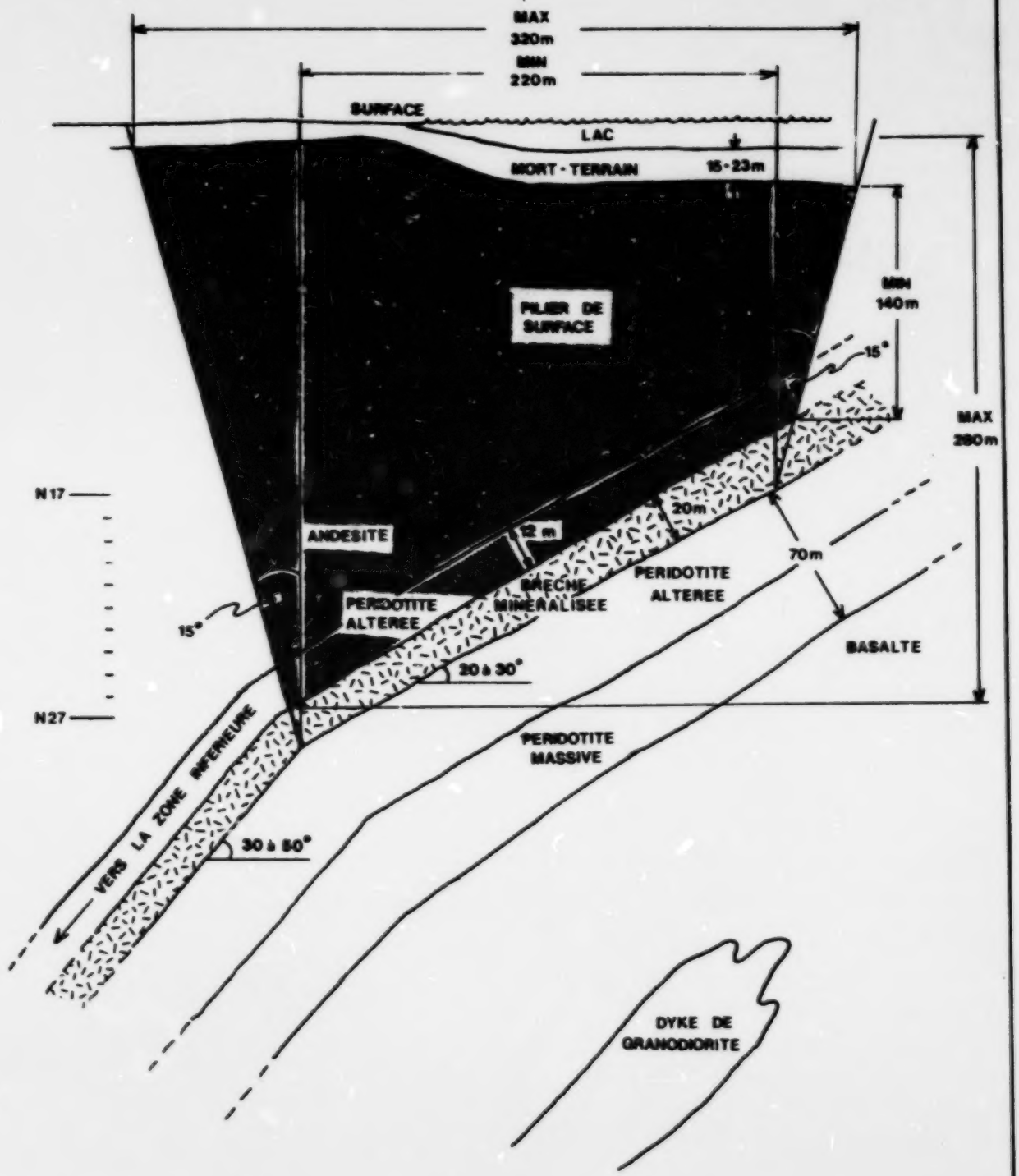


FIG. 6.5 SECTION VERTICALE DU PILIER DE SURFACE

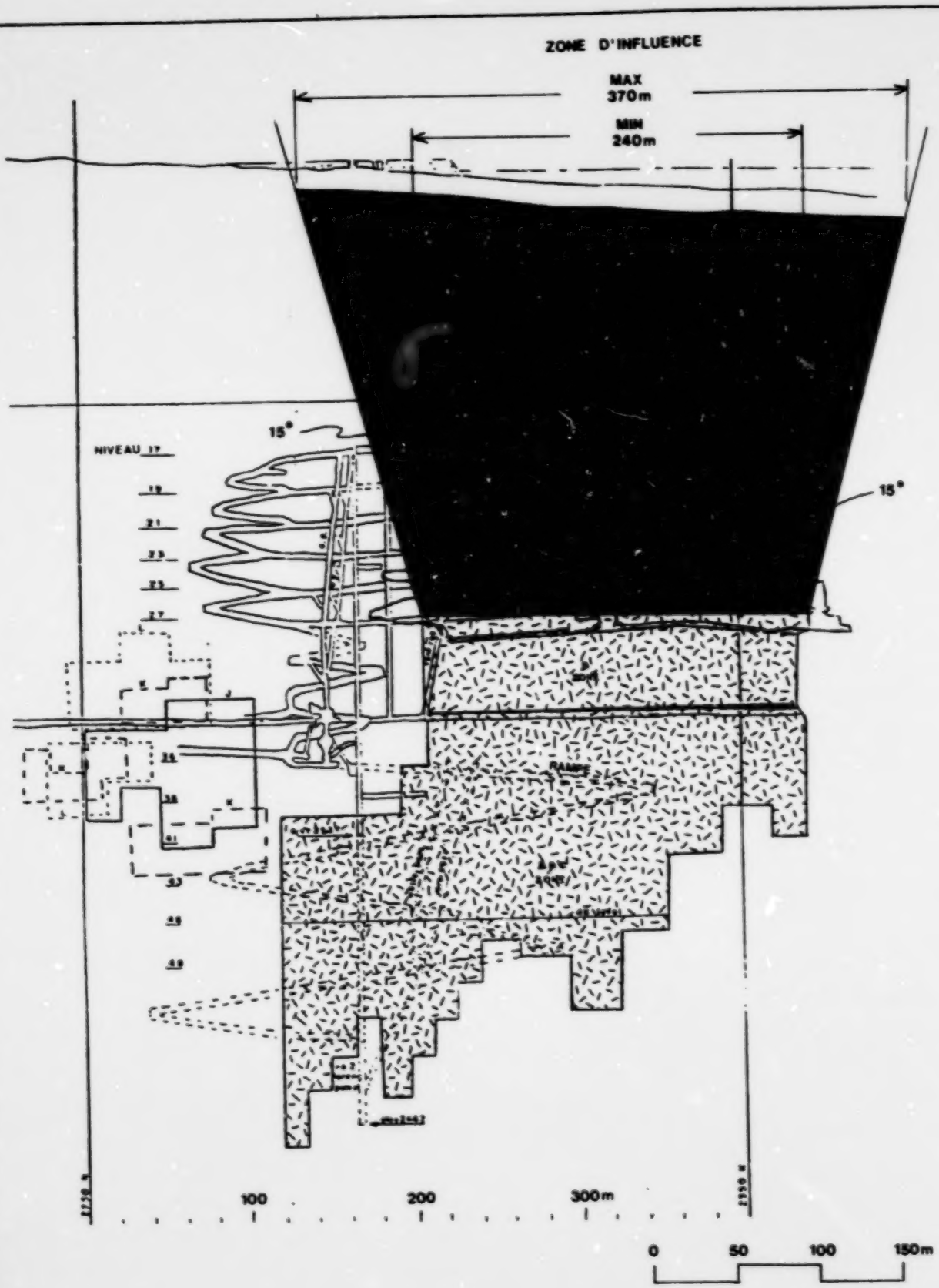


FIG. 6.6 COUPE LONGITUDINALE COMPOSEE DU PILIER DE SURFACE

6.4 ELEMENTS DE CONCEPTION DU/DES PILIERS DE SURFACE

6.4.1 Etudes des conditions d'eau

La zone minéralisée actuellement exploitée s'étend sous un lac de 2 à 5 mètres de profondeur. Il est à noter qu'au début de l'exploitation, un ancien puits d'exploration situé plus à l'ouest de la mine était présumé rempli d'eau. Très tôt après l'assèchement du puits actuel, l'ancien puits se sera asséché et est demeuré sec depuis ce temps. Cela suggère que les opérations présentes suffisent à drainer le secteur et qu'il ne semble pas y avoir d'apport d'eau important à l'intérieur de la zone exploitée. Comme l'eau n'est visiblement pas un problème, la direction de la mine n'a pas conduit d'étude hydrogéologique. L'on présume également que la composition argileuse et silteuse des lits de mort-terrain du fond du lac prévient l'infiltration verticale de l'eau dans le massif sous-jacent. Nous avons constaté de légères venues d'eau sporadiques à l'intérieur des zones de contact constituées de péridotite altérée, pratiquement absence d'eau dans la brèche minéralisée alors que l'éponte supérieure est totalement sèche. Pour les raisons que nous venons de décrire, aucun piézomètre n'a été installé.

6.4.2 Sols au-dessus de la zone minéralisée

L'épaisseur de mort-terrain varie de 15 à 23 mètres et est constituée de trois lits d'épaisseur variable formés d'argile, de silt stratifié et de till sablonneux.

6.4.3 Modélisation de la mine

La stabilité générale de la mine a été étudiée avec l'aide d'une modélisation utilisant la méthode des éléments finis appliquée à une section transversale "type" de la mine. Il a été nécessaire en premier lieu de choisir quelques coupes verticales représentatives de la zone exploitée. Le modèle utilisé étant en deux (2) dimensions, de telles coupes étaient suffisantes. La géologie locale, interprétée à partir des premiers sondages de surface ainsi que de ceux forés depuis les galeries d'exploration ou de développement disponibles, a ainsi été compilée. Les carottes ont été réévaluées et la valeur du RQD déterminée pour l'ensemble du massif. Seules les structures majeures ont été incluses dans le modèle et correspondent généralement avec un changement de type de roche. En se référant à la figure 6.1, nous pouvons visualiser les cinq (5) principaux types de roches que l'on retrouve à l'intérieur de la zone exploitée. Nous les décrirons plus en détails à la section suivante.

Le modèle en 2 dimensions utilise les données de base suivantes:

- la résistance en compression uniaxiale
- la densité de la roche
- le module de Young
- le coefficient de Poisson
- les contraintes naturelles verticales et horizontales
- la cohésion C et l'angle de friction interne ϕ

Dans ce cas, le modèle a été supposé élastique-linéaire et le critère de rupture utilisé est celui de Mohr/Coulomb. Notons que la valeur moyenne de la résistance en compression uniaxiale obtenue en laboratoire pour chaque groupe de roche a été modifiée avant d'être utilisée dans le modèle. Ainsi, afin de tenir compte de l'effet d'échelle, de forme et de la présence de discontinuités à l'intérieur du massif, des facteurs pré-déterminés par l'utilisateur ont été employés. La résistance "théorique" en compression uniaxiale a été abaissée par des facteurs variant de 75% pour la péridotite à 10% pour la roche compétente constituant la brèche minéralisée. La résistance en compression utilisée pour le basalte et l'andésite était de 0,70 à 0,75 de leur valeur de laboratoire. Nous retrouvons au tableau 6.1 la valeur moyenne de la résistance en compression uniaxiale de ces roches.

La simulation de la séquence de minage n'a pas été incluse dans le modèle.

L'aspect intéressant de cette modélisation est de permettre à la direction de concentrer ses efforts sur les zones potentiellement faibles ou instables. Cette méthode identifie des secteurs où il peut être avantageux d'utiliser très tôt des méthodes de renforcement, d'installer des instruments de mesure de déplacements et sert vraiment de guide à la planification de la séquence de minage.

TABLEAU 6.1 : RESISTANCES EN COMPRESSION UNIAXIALE DES ROCHES

MATERIEL	SITE DE PRELEVEMENTS	RESISTANCE EN COMPRESSION UNIAXIALE MPa
Andésite	Eponte supérieure	99
Peridotite altérée	Contacts	43
Brèche	Gisement	71
Basalte	Eponte inférieure	185
Dyke grano-dioritique	Localement	233

Comme nous l'avons déjà mentionné, le modèle a été utilisé pour l'ensemble de la mine. Cette approche a été reprise en mettant l'accent sur la zone supérieure de la mine, zone que nous avons défini comme étant le pilier de surface. De l'avis de la direction, étant donné l'épaisseur considérable de cette zone et l'utilisation des mêmes données de base pour cette nouvelle étude, les résultats obtenus sont sensiblement les mêmes que ceux générés par le modèle général.

6.4.4 Mécanique des roches

Depuis le début des opérations, la compagnie s'intéresse à la mécanique des roches. En plus du chef-ingénieur, un spécialiste travaille à plein temps dans ce domaine. Il semble exister une étroite collaboration entre ce secteur des opérations et le département de géologie de la mine. Les premières données de mécanique des roches originent de l'interprétation de la géologie locale. Les carottes de sondage ayant définies cinq (5) zones spécifiques de roche, des essais en laboratoire ont permis de les caractériser et d'en apprécier le comportement. Depuis ce temps, tous les sondages sont évalués et contribuent à accroître les connaissances de ces zones. L'importance de l'aspect structural est reconnue et la mesure du RQD est obtenue de façon systématique. Des mesures "in situ" ont été effectuées afin de déterminer les valeurs des contraintes naturelles horizontales et verticales, permettant ainsi de calculer le rapport Ko défini par $\frac{\sigma h.}{\sigma v}$

Les résultats obtenus indiquent que dans la direction NE-SO ou celle de l'axe longitudinal du gisement, Ko = 3,0 alors qu'à angle droit dans la direction NO-SE, Ko varie de 1,5 à 2,5.

Le département utilise ces informations au niveau de la planification du minage, du support local et de l'évaluation de la stabilité générale de la mine, dont la modélisation en est un exemple. Au site même des opérations, divers instruments de contrôle permettent un suivi indispensable.

6.4.5 Soutènement

Le principal mode de contrôle de la stabilité est l'utilisation permanente ou temporaire de piliers de soutènement. Nous avons déjà mentionné que le gisement était découpé par trois piliers transversaux de 15 mètres de largeur et que les chambres à l'intérieur des chantiers étaient séparées par d'autres piliers longitudinaux larges de 10 mètres. Le contrôle général de la stabilité est de plus assuré par le remblayage hydraulique des chantiers. Ce remblai est consolidé par l'addition de ciment dans un rapport 30:1 pour les chantiers de coupe et remblai et de 20:1 pour les zones exploitées par longs trous ou chambre ouverte. Le rôle de ce remblai est d'une part de fournir un nouveau plancher de travail pour les coupes subséquentes et d'autre part, de prévenir le déplacement excessif et subit des épontes ou parois des piliers.

Dans un contexte plus local, le support des galeries de développement et des accès permanents est assuré par l'installation de boulons scellés à la résine combinée ou non avec du grillage à mailles de 10 cm x 10 cm. Généralement, le patron de boulonnage employé est de 1,2 x 1,2 mètres; la longueur des boulons variant selon les dimensions des ouvertures et la nature du terrain.

La zone la plus instable ou susceptible de l'être a été identifiée, par expérience et modélisation, et est située dans l'éponte supérieure, au contact du gisement. Elle est composée de péridotite altérée et s'étend sur quelques 12 mètres d'épaisseur en moyenne, tel qu'illustré à la figure 6.7. La méthode de soutènement consiste à installer une série de câbles d'acier cimentés à angle droit avec la formation de péridotite. Ces câbles sont mis en place à partir des premiers chantiers exploités. Ils traversent donc la minéralisation mais pénètrent d'au moins de 10 mètres à l'intérieur de la péridotite. Ce type de support semble très bien fonctionner. Les opérateurs sont en mesure de vérifier l'installation des câbles au moment de la coupe du chantier supérieur. La longueur des câbles d'acier de 2 cm de diamètre varie de 12 à 21 mètres, le patron d'installation est de 2,5 x 2,5 mètres, le coulis est un ciment régulier de type 10 ou 30 et les câbles ne sont pas pré-tensionnés dans les trous.

Des boulons réguliers à coquille d'expansion sont utilisés dans les chantiers, pour assurer la sécurité des équipes de travail. Ils ont une utilité temporaire puisque les ouvertues seront remblayées par la suite.

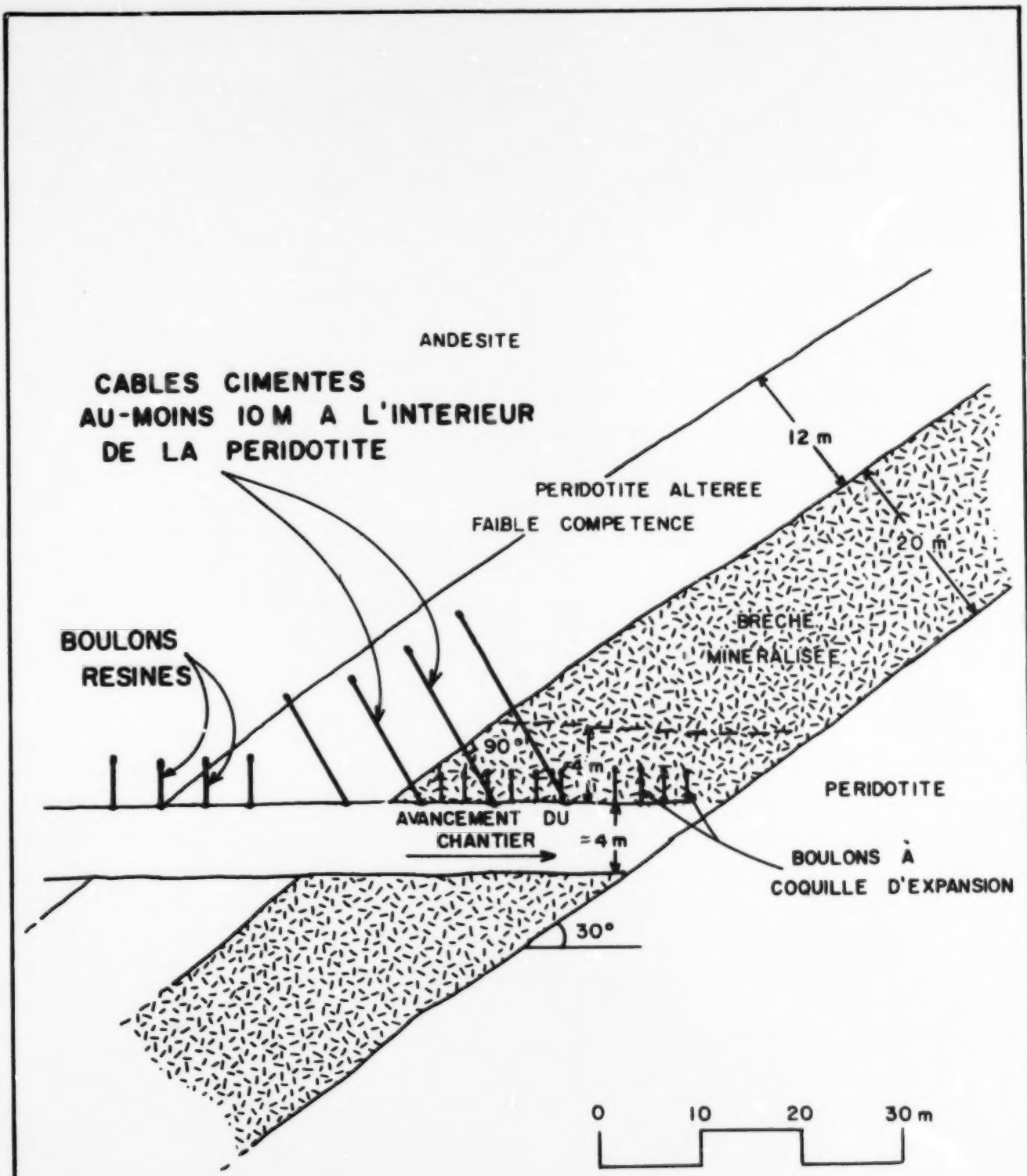


FIG. 6.7 EXEMPLE DE SOUTENEMENT

6.4.6 Instrumentation / mode de contrôle

Nous avons déjà mentionné que l'éponte supérieure est une zone probable d'instabilité et qu'elle est systématiquement boulonnée à l'aide de câbles d'acier cimentés. C'est dans le but de connaître son comportement que sept (7) extensomètres à tiges ont été installés. Plusieurs de ces instruments sont localisés au niveau 17, soit à l'intérieur même du pilier de surface. Les appareils sont à ancrages multiples (4 ou 5 tiges). A ce jour, ils n'ont décelé aucun mouvement de l'éponte supérieure. Ils sont un élément important du programme de mécanique des roches de la compagnie.

La stabilité est aussi évaluée localement par des inspections de routine des chantiers actifs. Notons, à titre d'information, que la mine utilise les têtes de deux extensomètres comme points de référence pour des mesures de convergence d'une galerie. Dans cette galerie du niveau supérieur de la mine, un extensomètre est installé dans le plancher et orienté vers le gisement alors que le second est installé dans le plafond et orienté vers le haut. Tous deux sont situés dans un même plan vertical. Les deux têtes de lecture servent alors à mesurer s'il y a ou non convergence de cette galerie.

6.4.7 Géométrie des piliers de surface

En combinant les figures 6.1, 6.5 et 6.6, l'on constate qu'il est extrêmement difficile de définir les trois dimensions principales du pilier de surface. En fait, à cause de la présence des (3) piliers transversaux, nous pouvons même considérer trois (3) piliers de surface situés immédiatement au-dessus des chantiers supérieurs. Dans le cas de cette mine, nous serions tentés, principalement à cause du faible pendage de la zone supérieure du gisement, d'englober toute l'éponte supérieure dans notre définition du pilier de surface. Le pilier aura ainsi les caractéristiques illustrées aux figures 6.5 et 6.6 et au tableau 6.2.

6.4.8 Evaluation du massif rocheux

Tel que mentionné précédemment à la section 6.4.3, l'évaluation du massif rocheux a été faite à partir des forages d'exploration de surface et de ceux des galeries souterraines disponibles. En plus des plans et sections traditionnels, beaucoup d'emphase a été mise sur la mesure du R.Q.D. du massif rocheux depuis la réouverture de la mine.

La première interprétation, basée sur la répartition des valeurs de R.Q.D. en cinq (5) classes de roche, n'a pas permis à la direction d'obtenir une image claire du massif rocheux. A cause du changement trop fréquent des classes, il n'était pas possible de cerner des zones continues ou encore

TABLEAU 6.2 : DIMENSIONS DE PILIERS DE SURFACE ET CHANTIERS SOUS-JACENTS

	EXEMPLES			
PILIERS DE SURFACE	No 1	No 2	No 3	No 4
MORT-TERRAIN:				
- Epaisseur (m)	19	19	19	19
PILIERS DE SURFACE:				
- Epaisseur (m)	179	179	179	179
CHANTIERS:				
- Longueur (m)	250	250	250	250
- Largeur (m)	40	40	45	40
- Hauteur (m)	24	24	24	24

REMARQUES Toutes les données du tableau représentent des moyennes.

de bien relier les trous de sondage entre eux. Il a donc été décidé de ramener le nombre de classes à trois seulement, de les identifier par une couleur différente et de les pondérer par un qualificatif. Le résultat de cette simplification de la méthode générale est donc le suivant:

R.Q.D. POINTAGE %	COULEUR	QUALIFICATIF DU ROC
0 - 50	Rouge	Très mauvais à mauvais
50 - 75	Jaune	Moyen à Bon
75 - 100	Vert	Très bon à excellent

A titre d'information, nous présentons ci-dessous le tableau de la classification originale de Deere (1964).

R.Q.D. POINTAGE %	QUALIFICATIF DU ROC
< 25	Très mauvais
25 - 50	Mauvais
50 - 75	Moyen
75 - 90	Bon
90 - 100	Très bon

Il est certain que nous ne pouvons comparer les résultats obtenus à cette mine avec d'autres compilations. Toutefois, la simplification utilisée par cette compagnie lui a permis de mieux visualiser sur sections verticales la position relative et la catégorie des diverses zones de roche. C'est d'ailleurs à partir de cette information, combinée avec la cartographie des tunnels d'exploration déjà établie, que la direction a pu décider de la position des galeries de service, accès divers ou installations de service.

Cette détermination du R.Q.D. est jugée comme suffisante en ce sens qu'elle permet une assez bonne caractérisation du massif rocheux et répond aux besoins de cette opération particulière. Depuis la réévaluation des premiers sondages, la compagnie poursuit systématiquement ce travail sur toutes les carottes de forage recueillies. Aucune autre méthode d'évaluation du massif rocheux n'est utilisée à cette mine sur une base routinière.

6.4.9 Divers

Depuis quelques temps, à cause de la forme tabulaire du gisement et du faible pendage de sa partie supérieure, les autorités de la mine pense à évaluer l'effet de la séquence de minage sur la stabilité générale de l'opération.

6.5 BILAN DE LA VISITE

Cette propriété est particulière en ce sens que nous devons vraiment considérer le pilier de surface comme une large zone de massif située au-dessus de tous les chantiers supérieurs

de la mine. L'éponte supérieure devient alors partie intégrale du pilier de surface qui atteint ainsi des dimensions importantes.

L'approche suivie par la compagnie est un processus dynamique qui suit l'évolution du minage. La stabilité du pilier de surface est intimement reliée à la stabilité générale de la mine. Il peut se présenter des zones particulières où la compétence du terrain sera plus faible. Ces zones sont délimitées par l'application de modèles d'étude par éléments finis. Les modèles deviennent de plus en plus réalistes avec l'apport constant de données de terrain.

POOR

QUALITY

ORIGINAL